V.E. PATON

EL FUEGO COSE EL METAL

V.E. PATON
A.N. KORNIENKO

EL FUEGO COSE EL METAL

Contenido

INTRODUCCIÓN

Navega el barco. Su casco y superestructuras de cubierta están soldadas. Corre raudo el tren, tanto su locomotora eléctrica, como los vagones también son productos de la soldadura. De igual modo se sueldan los carriles por donde corre el tren, los puentes que atraviesa. Tampoco ha sido posible prescindir de la soldadura al crear cohetes y aviones, al construir edificios de vivienda, centrales eléctricas, fábricas y talleres. El progreso de la técnica, de manera considerable, se basa en el perfeccionamiento de métodos aplicados a unir piezas. En el presente, la soldadura en multitud de casos define, en conjunto, el nivel tecnológico de la producción. Se ha convertido en el proceso tecnológico rector y culminatorio en la unión de piezas. La soldadura se utiliza para montar nuevas estructuras, reparar máquinas y aparatos, restaurar obras destruidas. Las estructuras soldadas prestan su servicio a temperaturas ultraaltas y ultrabajas, bajo presiones superiores a la atmosférica y en condiciones del vacío cósmico.

Los modernos adelantos en el terreno de la soldadura permiten unir no sólo metales, sino también plásticos, vidrio, algunas clases de cerámicas y otros materiales. Se puede soldar al aire libre, debajo del agua y en el vacío, en las abrasadoras arenas del Sahara y en los hielos del Artico. Los cosmonautas soviéticos G. S. Shonin y V. N. Kubasov, a bordo de la nave cósmica "Soyuz-6", por primera vez en el mundo realizaron la soldadura en condiciones del vacío cósmico y de ingravidez.

En la actualidad la soldadura comienza a desplazar a otros modos de unión inseparable de metales: remachado, colada, forja. No obstante, con frecuencia, establece una alianza creadora con sus contrincantes. Como resultado de eso se crean artículos soldado-colados, soldado-forjados y soldado-estampados.

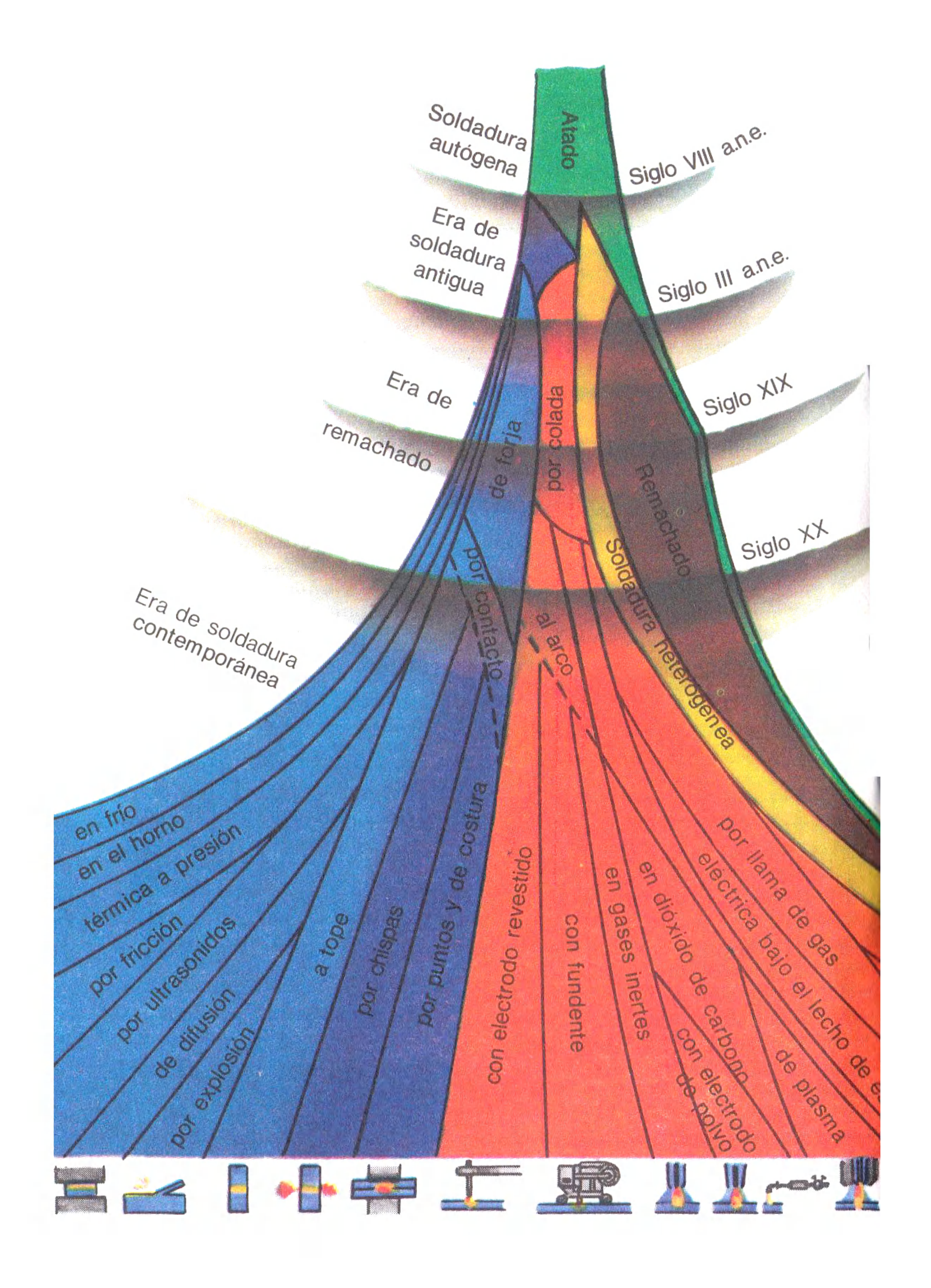
El desarrollo de la soldadura se debe a que ella aumenta la resistencia mecánica y la durabilidad de las estructuras, economiza metal y reduce el costo y los plazos de trabajo. Ante la nueva generación de científicos, ingenieros y soldadores están planteadas una multitud de tareas en la creación investigadora, cuya solución requiere una inteligencia ansiosa, gran erudición y energía.

En este libro se narra sobre el objeto de que trata la ciencia de la soldadura, las vías de su fomento, los resultados científicos y los logros técnicos alcanzados.

Algo sobre la historia de la tecnología de uniones

Etapas en la tecnología de producción. Los primeros instrumentos de trabajo y caza del hombre primitivo (además de piedras y raspadores) fueron el hacha de piedra y un manojo de piedras pesadas atadas a largas correas. La tecnología, es decir, los instrumentos y métodos de trabajo, era muy simple: los especialistas antiguos tallaban las piedras adecuadas, rompían ramas de árboles y ataban unas con otras, empleando lianas o tendones de los animales que mataban. Pero para llegar a idear eso, o sea, formar un artículo, compuesto por dos piezas separadas, mediante atadura, era necesario poseer ya pensamiento creativo. La preparación de los primeros instrumentos primitivos resultó ser un gran paso en la evolución de la humanidad.

Los filósofos e historiadores de épocas antepasadas intentaron por todos los medios imaginarse la historia de la sociedad primitiva basándose en mitos, leyendas e investigaciones arqueológicas. Ya a comienzos del siglo XIX, los arqueólogos acumularon gran cantidad de conocimientos sobre los instrumentos del hombre primitivo. K. Thomsen, arqueólogo danés, sistematizando objetos de la cultura material antigua, que se conservan en el Museo Nacional de Copenhague, llegó a la conclusión de que cuanto más viejos eran los artículos tanto más primitivo era su labrado y tanto más simple la tecnología para su preparación. Resultó que los artículos de piedra se obtuvieron antes que los de cobre y bronce, además los más "jóvenes" eran los objetos de hierro. A tenor de ello, Thomsen, en 1836 propuso dividir el desarrollo de la sociedad primitiva en tres períodos: La Edad de Piedra, La Edad del Bronce y La Edad del Hierro. Esta clasificación la fundamentó basándose en los diferentes materiales de los cuales se preparaban, a preferencia, los artículos en los siglos



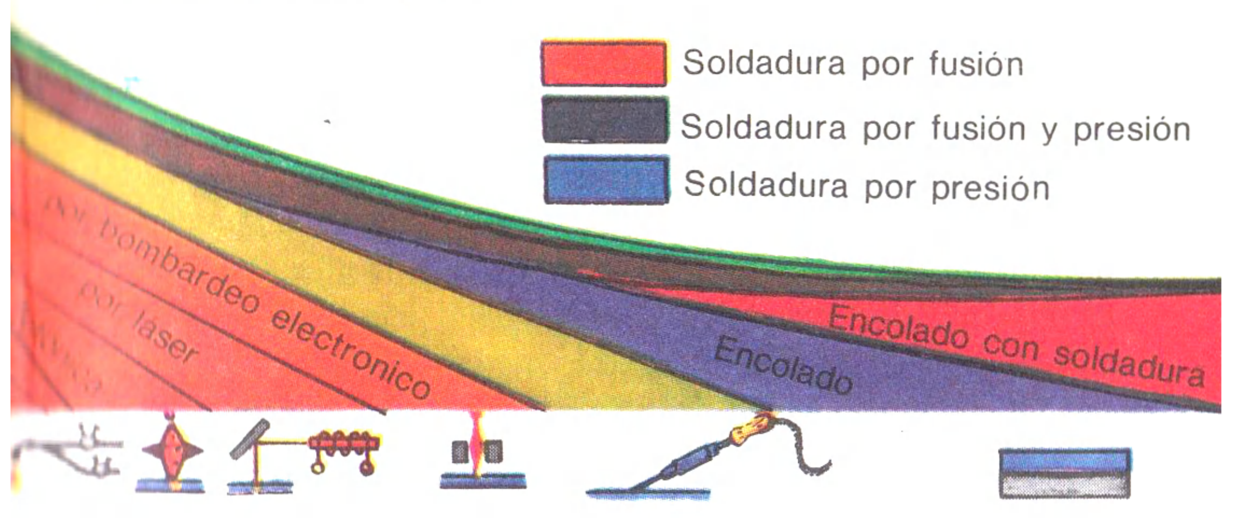
Atado
Soldadura autógena
Siglo VIII a.n.e.
Era de soldadura antigua
Siglo III a.n.e.
Era de remachado
Siglo XIX
de forja
por colada
Remachado
Siglo XX
Era de soldadura contemporánea
por contacto
al arco
Soldadura heterogénea
en frío
en el horno
térmica a presión
por fricción
por ultrasonidos
de difusión
por explosión
a tope
por chispas
por puntos y de costura
con electrodo revestido
con fundente
en gases inertes
en dióxido de carbono
con electrodo de polvo
por llama de gas
eléctrica bajo el lecho de e
de plasma

correspondientes. Sin embargo, diferían no sólo los materiales, sino también los procedimientos utilizados para elaborarlos. Hoy conocemos multitud de métodos para unir piezas, pero en la antigüedad el primordial y, quizá el único, era el atado. Este método en tiempo coincide con La Edad de Piedra.

En las edades del Bronce y del Hierro, cuando se empezó a asimilar los metales, fue necesario crear una nueva tecnología de empalme. El primer modo en la unión de metales resultó ser la soldadura de forja.

Era de la soldadura por forja. El hombre, apropiándose de una piedra de forma adecuada, comenzó a forjar, partiendo de pepitas de oro, plata, cobre, diversos instrumentos y utensilios domésticos. No está excluido que aplicando ese mismo procedimiento "forjaban" en un todo unos cuantos trozos de metal sin calentamiento. Incluso en el presente para unir metales, que poseen buenas propiedades plásticas, se emplea la soldadura en frío, basada en la aplicación de esfuerzos deformadores.

Los métodos para unir partes de artículos fueron perfeccionándose desde los tiempos más remotos. Si en la Edad del Bronce a los hombres les bastaban tres o cuatro procedimientos, en la época presente se han elaborado ya decenas de ellos. Los fundamentales se ilustran en este esquema.



Al surgir un nuevo material, el bronce (aleación de cobre con estaño), los especialistas antiguos se vieron obligados a elaborar nuevos métodos de empalme. El bronce poseía propiedades mejores en comparación con los materiales iniciales: mayor dureza, resistencia mecánica, resistencia al desgaste. Sin embargo, posee peor ductilidad que el cobre. Por lo tanto, la soldadura por forja de piezas de bronce, incluso con calentamiento, no podía proporcionar alta calidad en la unión. Entonces surgió la soldadura por colada en la cual los bordes de los artículos a ligar se moldeaban (rodeándolos con una mezcla especial de arena), virtiendo después el metal líquido recalentado. Este metal de aportación se fundía con las piezas formando, al enfriarse, la costura. Semejantes costuras se descubrieron en recipientes de bronce que se conservaron desde los tiempos de la Antigua Grecia y la Antigua Roma.

En los milenios III–II antes de nuestra era (a. n. e.) en diversas regiones del globo terráqueo, se comenzó a utilizar el hierro para hacer instrumentos de trabajo y armas. En el proceso de producción del metal en cuestión jugó un papel importante la soldadura por forja de lupias. Estas son en sí bloques sin forma definida con un peso de 50–100 kg, compuestas por gránulos de hierro puro y escoria ferruginosa. Las lupias se obtenían a partir del mineral de hierro, calentándolo junto con carbón de leña. Las partículas aglutinadas de hierro reducido, carbón y escoria, se forjaban unas cuantas veces en estado caliente. De esta manera, las partículas separadas de hierro se unían, es decir, de soldaban, formando un metal compacto, mientras que las partículas de escoria y carbón se separaban. A fin de incrementar la masa de metal, algunas piezas en bruto se calentaban hasta su incandescencia, apilándolas y forjándolas después.

Durante la Edad Media los herreros soldadores lograron alta pericia en la preparación de instrumentos de trabajo y armas. Recurriendo a la soldadura por forja, fiándose en la

experiencia y la intuición, preparaban el metal alternando en determinada secuencia capas de acero duro y hierro blando. Los filos multilaminares de los arados y espadas eran autoafilables.

Las soldaduras en frío, por colada y de forja fueron los primeros procesos tecnológicos en la historia de la técnica a base de los cuales los hombres pudieron obtener uniones inseparables de metales. En estos procesos se lograba la firme adherencia de las superficies en contacto a cuenta de la interacción de los átomos.

En ese mismo tiempo comenzó a usarse la soldadura heterogénea de metales, con la cual los metales se unen con ayuda de un tercero, cuya temperatura de fusión es más baja, el llamado metal de aportación.

Los primeros procedimientos de soldadura homogénea eran imperfectos, debido a que en aquel entonces no se disponía de potentes fuentes de caldeo. Resultaba muy difícil calentar uniformemente grandes estructuras y artículos complejos y forjar de inmediato los lugares de empalme, o bien llenar por completo la ranura, puesto que el metal se enfriaba con rapidez.

Por esta causa, ya en el avanzado siglo del bronce, se comenzó a aplicar un tipo más de unión de metales – el remachado. Antes de unir dos hojas de metal, éstas se ajustaban una a la otra, en ellas se punzonaban agujeros, preparaban y calentaban los roblones, estos últimos se colocaban en los agujeros, remachándolos después con un mazo.

En el Medioevo los principales materiales de construcción eran la madera y la piedra. Para su ensamblaje no se precisaba de la soldadura, además, a fin de obtener los escasos artículos metálicos, bastaba con los procedimientos ya conocidos de soldadura. Sobre todo se empleaban con frecuencia el remachado y la soldadura por forja.

Por el camino hacia la soldadura moderna. En el siglo XVIII surgió la producción mecanizada. Aumentaron considerablemente las necesidades de metal, construcciones metálicas, medios de transporte, mecanismos, máquinas a vapor, etc. Se exigían también nuevos métodos de unión y reparación de artículos metálicos, más productivos y únicos.

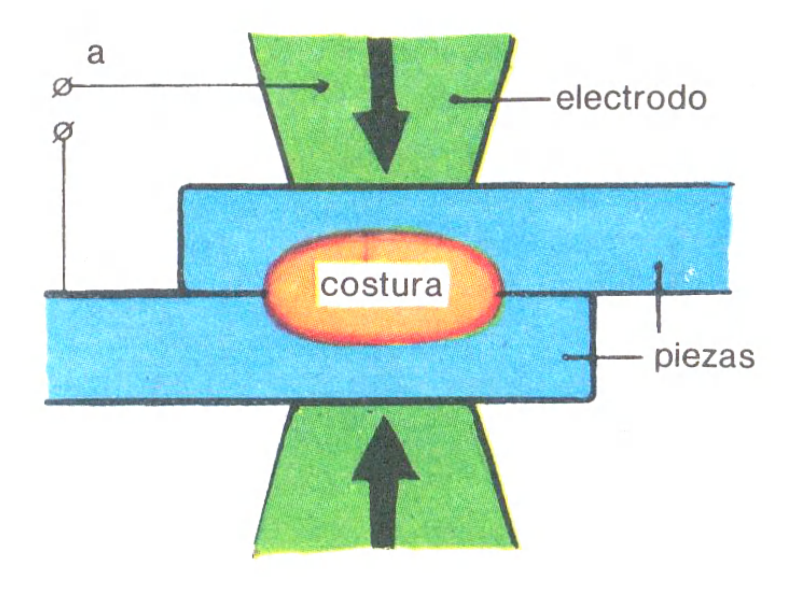
Los nuevos descubrimientos en la física y química, los inventos científico-ingenieriles en la mecánica, electrotecnia, metalurgia, así como el dominio de la producción industrial de energía eléctrica, oxígeno y gases combustibles, junto con su empleo en las más diversas ramas de la técnica, permitieron crear nuevos procedimientos de soldadura.

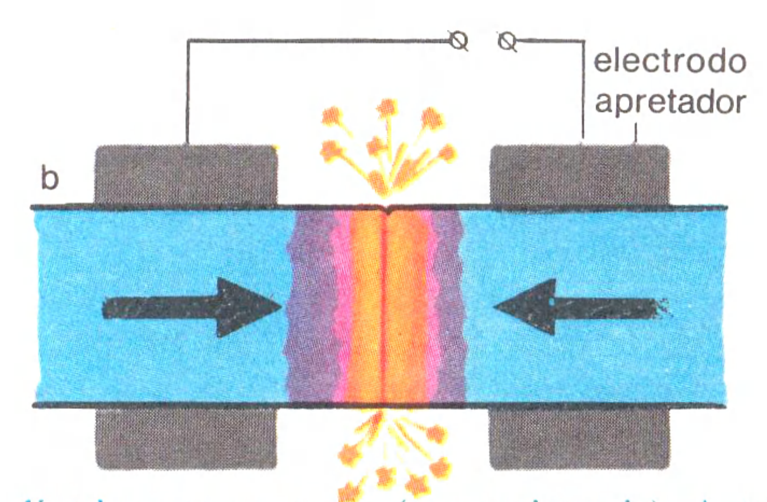
A fines del siglo XVIII, el físico italiano A. Volta creó una fuente de energía eléctrica de prolongado funcionamiento: la pila de Volta. Esto dio impulso a la utilización de la electricidad en la soldadura. En el año 1802, el científico ruso V. V. Petrov descubrió el efecto del arco eléctrico y demostró la posibilidad de su empleo para fundir metales. En 1841–1842, los científicos – el inglés J. Joule y el ruso E. J. Lenz – independientemente uno del otro, hicieron el mismo descubrimiento: determinaron la cantidad de calor que se desprende de un conductor cuando por él circula la corriente eléctrica.

También se ocuparon con éxito de la elaboración de nuevas fuentes caloríficas los químicos: el científico ruso N. N. Bekétov y los franceses B. Berthelot y Le Chatelier.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, la industria conquistó nuevos medios físico-químicos de acción sobre el metal, que comenzaron a desplazar hacia un segundo plano las herramientas mecánicas.

El efecto del arco eléctrico que descubrió el científico ruso V. V. Petrov, empezó a usarse en proyectores y lámparas especiales para el alumbrado; en instrumentos rectificadores de corriente y controladores de su intensidad; en la metalurgia para calentar y fundir metales.





Soldadura eléctrica por contacto (por resistencia). A través de las piezas, previamente comprimidas, se hace pasar corriente eléctrica. En la zona de contacto de las piezas, que es la que tiene la mayor resistencia, comparada con las demás secciones del circuito de soldadura (electrodos, conductores), se desprende la mayor cantidad de calor. El calentamiento hasta la fusión, o hasta el estado plástico, y el esfuerzo de compresión forman una unión soldada. En el esquema están representadas las soldaduras: a) por puntos; b) a tope.

facilitar el proceso de soldadura, el inventor construyó portadores eléctricos rodeados con sopletes de gas.

El descubrimiento de N. N. Benardos posteriormente lo perfeccionó su contemporáneo, otro inventor ruso

N. G. Slavianov, sustituyendo el electrodo de carbón por otro metálico fusible. Este último inventor propuso utilizar la escoria como medio que protegía la costura a soldar contra la penetración del aire hacia ella, con lo cual se conseguía que la costura resultase de mayor resistencia mecánica y elevada fiabilidad. En el año 1886 el científico inglés E. Thomson y en el año 1887, N. N. Benardos, obtuvieron la patente para la soldadura por contacto. Al emplear esta soldadura, las piezas a unir se apretaban entre los electrodos. La corriente al pasar por las piezas calentaba algunos sectores de las mismas oprimiéndolas simultáneamente.

A fines del siglo XIX fue propuesto un nuevo método de soldadura basado en el empleo de la llama oxiacetilénica.

La potencia del arco y de la llama era suficiente para unir acero, cobre, latón, con un espesor de varios milímetros. Para soldar las juntas de carriles en las vías férreas y tubos de acero se empleaba termita (mezcla de limaduras de aluminio o magnesio con óxidos férricos). Al quemarse ésta se forma hierro metálico y se desprende una gran cantidad de calor. Una porción de termita se quemaba en un crisol de arcilla refractaria y la masa fundida se vertía en la holgura entre los extremos de los carriles.

De esta manera, en los dos decenios culminantes del siglo XIX, se propuso convertir la energía eléctrica y la de reacciones químicas en el calor necesario para soldar metales. Sin embargo, todos estos procedimientos de soldadura todavía no eran capaces de desplazar el remachado, puesto que las costuras obtenidas eran de baja calidad.

Soldadura en la época de la revolución técnico-científica. Los adelantos relevantes de la ciencia y de la técnica en el siglo XX, cimentaron las bases para los métodos modernos de soldadura.

El campo de aplicación de la soldadura se amplía sin interrupción. La soldadura se ha convertido en el proceso tecnológico rector al fabricar y reparar estructuras metálicas,

así como otros artículos en la industria, construcción, transporte, agricultura, etc. No obstante, aún no se han elaborado lo suficiente todos los métodos de soldadura. Algunos de ellos recién se implantan, analizando todavía sus posibilidades, por lo cual su empleo fundamental se encuentra aún en perspectiva. Otros ya han logrado su perfeccionamiento. También existen algunos que ya no satisfacen los requisitos de la técnica moderna.

Los métodos de soldadura se clasifican, según el tipo de energía utilizada para obtener la unión soldada, en: mecánicos, químicos, eléctricos, electromecánicos, químico-mecánicos, por rayos luminosos, etc. Por ejemplo, entre los mecánicos figuran la soldadura por fricción, en frío, por vibraciones ultrasónicas y otras: a los químicos pertenecen: por llama de gas y aluminotérmica; a los eléctricos se refieren: al arco, eléctrica bajo el lecho de escoria, al arco de plasma y otras.

Los métodos de soldadura se pueden clasificar asimismo a tenor de "quién y con qué" se realizan, en cuyo caso muchos de estos procedimientos podrían quedar agrupados en: a mano, mecanizados, semiautomáticos, automáticos. En función del método empleado para obtener la unión soldada se destacan los siguientes grupos fundamentales de procesos de soldadura: por fusión y por presión. Cuando se trata de la soldadura por fusión, una fuente especial de calor calienta y funde los bordes de las piezas a unir en un pequeño sector. Si se tiene en cuenta la soldadura por presión, para que pueda tener lugar la adherencia de los bordes, éstos se comprimen. En ocasiones, a fin de facilitar la adherencia, el lugar de la soldadura se calienta hasta el estado plástico del metal, o incluso, hasta fundirlo. La inmensa mayoría de los métodos de soldadura deben su nombre a la clase de energía y de

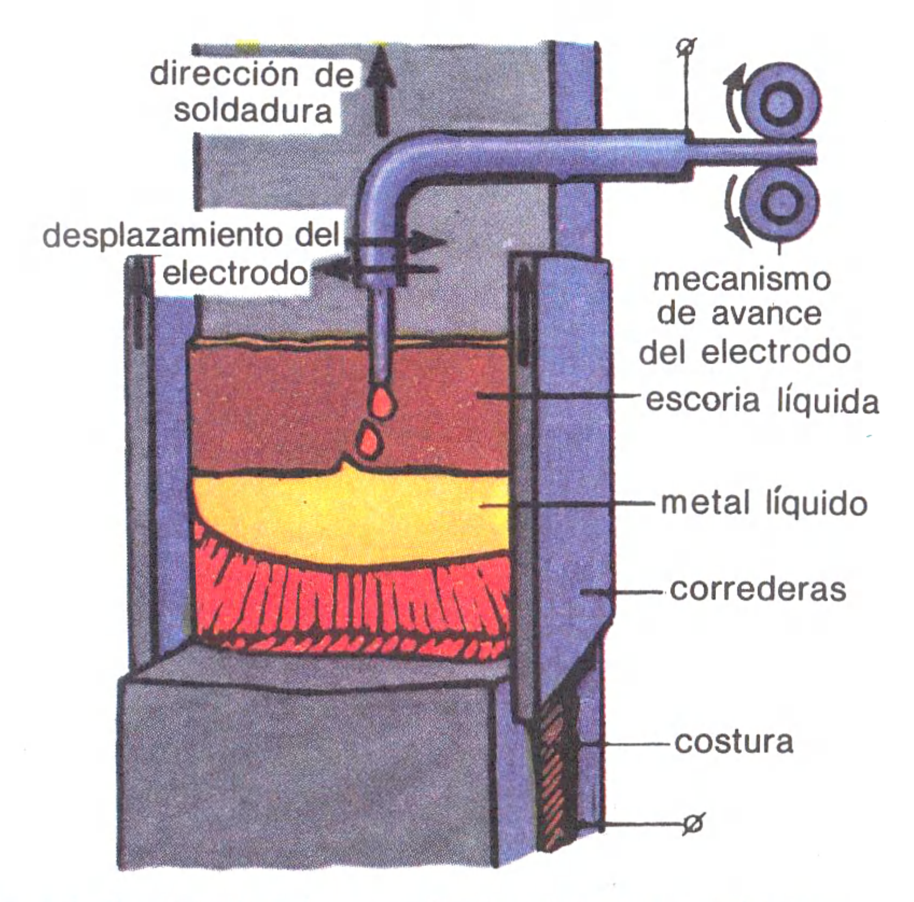
fenómenos físicos gracias a los cuales se asegura el enlace interatómico en el sitio de unión.

En el presente, los métodos más frecuentemente empleados son los de soldadura al arco, por lo cual nos referiremos a ellos con mayor detalle en los siguientes capítulos. La soldadura en cuestión nos servirá de base al describir los diferentes apartados de la ciencia que estudia la soldadura. Los métodos de la soldadura al arco, así como la aluminotérmica, por llama de gas, eléctrica bajo el lecho de escoria, por bombardeo electrónico, por láser y otros muchos, pertenecen a la soldadura por fusión.

La soldadura por presión incluye los siguientes métodos: por contacto, a presión con llama de gas, de difusión, en frío, por fricción, por vibraciones ultrasónicas, por explosión y algunos otros. Cada uno de estos métodos cuenta con determinadas posibilidades tecnológicas y se emplea al fabricar artículos concretos, considerando los requisitos de la producción.

La soldadura por llama de gas, que a principios del siglo XX fue la más difundida, mientras que en el presente se ha retrasado respecto a otros procedimientos en cuanto a su productividad, se utiliza en lo fundamental para trabajos de reparación, así como en aquellos lugares donde no hay electricidad. Las posibilidades de este método son limitadas: la llama de gas une metales (aceros, cobre, fundición) cuyo espesor es tan sólo de unos cuantos milímetros.

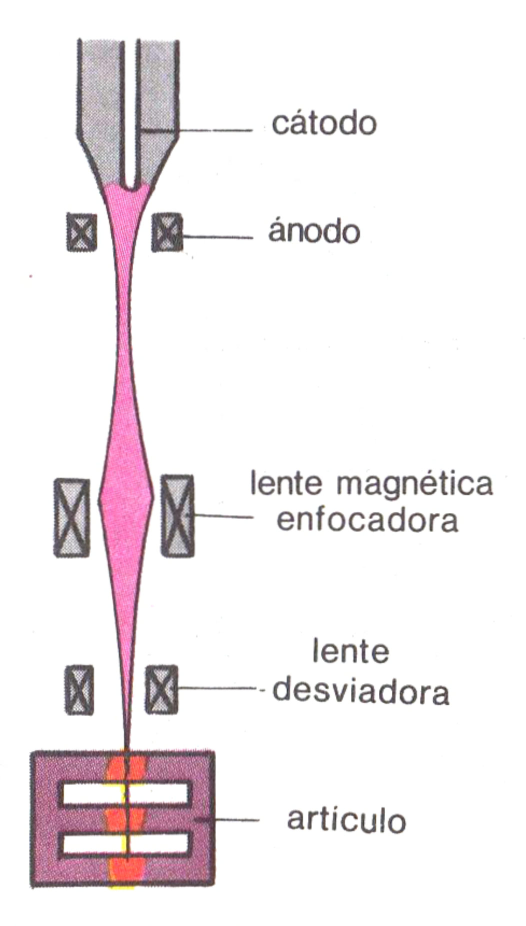
Para soldar estructuras de acero, cobre, titanio y aluminio, con un grosor de hasta varios metros, así como artículos de costuras de gran sección (calderas, bastidores de prensas, etc.), en el Instituto de Soldadura Eléctrica E. O. Patón se elaboró el método de soldadura eléctrica bajo el lecho de escoria. La "soldadura rusa" (así llamaron en el extranjero a esa soldadura) fue distinguida en Bruselas con el "Grand Prix" en la Exposición Internacional, adjudicándole la gran medalla de oro. Las firmas de multitud de países en el mundo adquirieron el equipo para la soldadura eléctrica



Soldadura bajo el lecho de escoria. Los bordes a soldar y el metal de aportación (del electrodo) se calientan por el calor desprendido en el baño de escoria. El electrodo (en forma de alambre o de lámina) y el artículo se conectan a diferentes polos y la corriente pasa por la escoria líquida. El metal líquido del electrodo se acumula en el espacio entre los bordes y unas correderas conformadoras especiales, que se desplazan a medida que se llena el espacio y solidifica el metal.

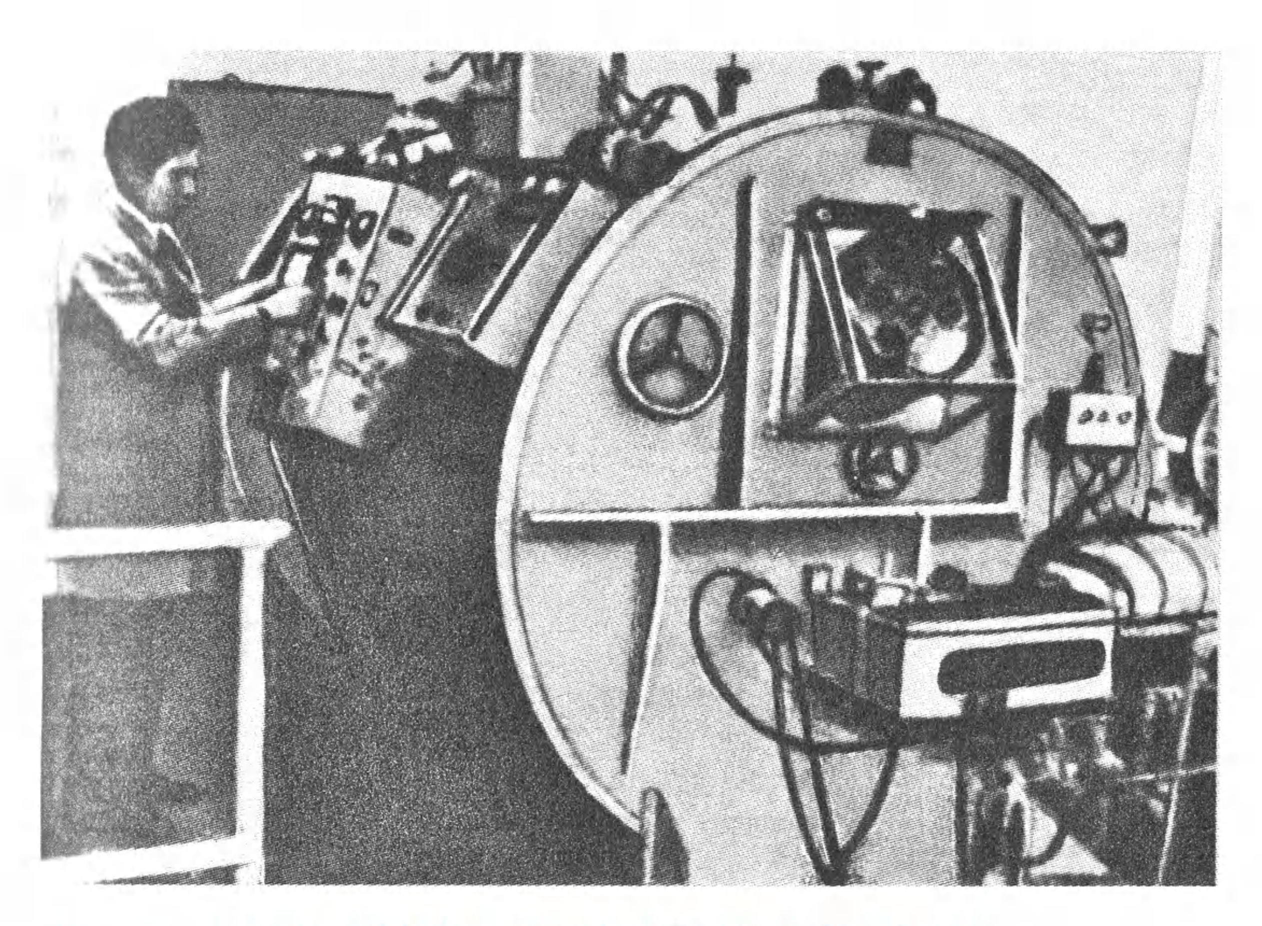
bajo el lecho de escoria, comprando la licencia. En la Unión Soviética con ayuda de la mencionada soldadura se fabricaron centenares de miles de toneladas de las más variadas estructuras, incluidos elementos únicos en su género, en cuanto a sus dimensiones y peso, para maquinaria voluminosa.

Se pueden ejecutar uniones de grosor desde fracciones de milímetro hasta varios decímetros usando la soldadura por bombardeo electrónico. Esta última se lleva a cabo en condiciones de vacío, imprescindible para el libre movimiento



La soldadura por bombardeo electrónico se efectúa en condiciones de vacío mediante un flujo enfocado de electrones. A causa del efecto del campo eléctrico, los electrones adquieren una energía cinética, igual a la mitad del producto de la masa del electrón por el cuadrado de la velocidad de movimiento. Esta energía cinética se gasta durante la interacción del electrón con la sustancia del artículo.

de los electrones y a fin de obtener una costura de metal puro. Merced a la elevada concentración de energía (hasta de 10^8 W/cm^2) y al alto vacío, este procedimiento es insustituible cuando se producen aparatos eléctricos al vacío de las más variadas clases. Este método garantiza la hermetización al vacío sin que sea preciso un bombeo adicional. En la energética atómica, la soldadura por bombardeo electrónico se emplea para soldar los elementos de combustible. El haz electrónico penetra en las estrechas holguras entre las piezas de la juntura, atraviesa unas cuantas capas, uniendo los elementos gruesos con los delgados. Esta clase de unión

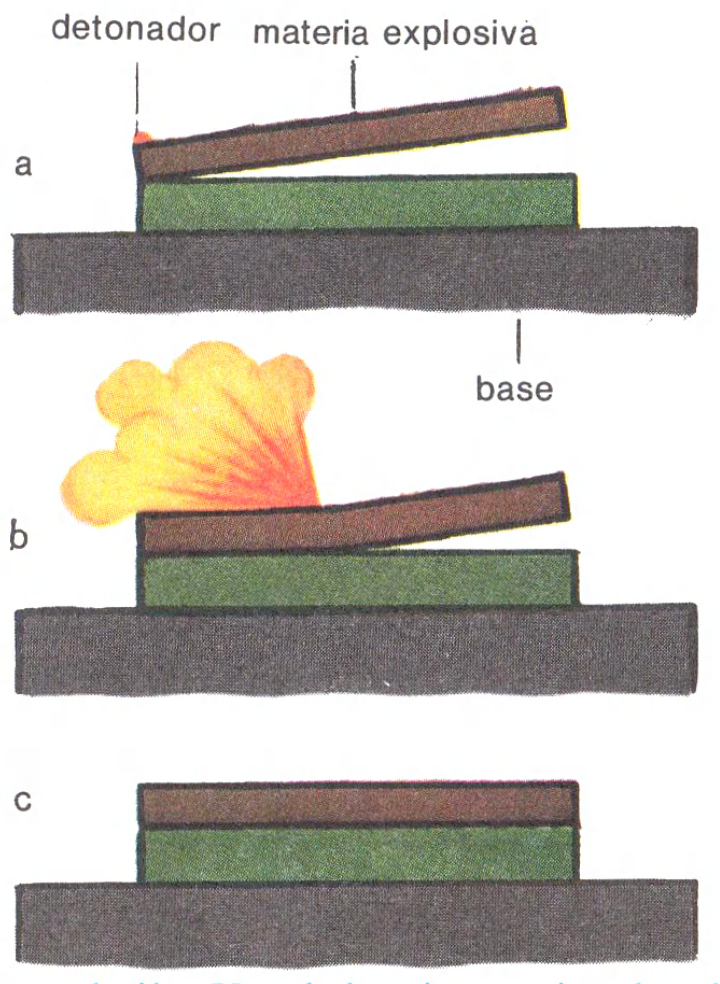


Cámara para la soldadura por bombardeo electrónico.

permite crear nuevas estructuras más sencillas de multitud de máquinas y aparatos importantes, aprovechando de la manera más eficaz las propiedades de los materiales.

A comienzos de los años 60 del siglo XX se crearon instalaciones de soldadura por láser de acción por impulsos y en el presente se someten con éxito a pruebas aparatos para la soldadura continua por láser de gran potencia. El rayo láser puede soldar tanto metales homogéneos, como heterogéneos. En este caso, las uniones soldadas se destacan por sus propiedades mecánicas elevadas.

La soldadura por difusión se basa en el fenómeno de la difusión al vacío. Este fenómeno (consistente en que las moléculas de una sustancia penetran en otra) transcurre con mayor intensidad cuando las piezas a unir simultáneamente se calientan y se comprimen. La soldadura se efectúa en una



Soldadura por explosión. Una de las piezas se instala sobre una base masiva. La otra, en cuya superficie se deposita una capa de materia explosiva, se coloca formando cierto ángulo con la primera. La carga se hace explotar desde uno de los extremos, la onda explosiva crea una gran presión, comprimiendo una pieza contra la otra.

instalación al vacío de la cual se ha succionado el aire hasta obtener el vacío de 10^{-4} mm Hg. Las piezas se calientan hasta 600–800°C con corriente de alta frecuencia. A esa temperatura se destruyen las películas de óxidos en la superficie de los metales que se unen, puesto que aquéllas obstaculizan la difusión. El apriete y el buen ajuste de las superficies facilitan la difusión. Por este procedimiento se unen incluso piezas de materiales frágiles, incluidas las de metales heterogéneos y metaloides. No obstante, para la soldadura por difusión hace falta un equipo complejo, las dimensiones de las piezas están limitadas por las de la

cámara de vacío, además, el proceso de difusión requiere mucho tiempo: 10–30 min.

El método más rápido de soldadura es la soldadura por explosión, mediante la cual superficies de varios metros cuadrados se unen en milésimas de segundo. Además, se pueden unir piezas de diferente masa y de metales heterogéneos. Este procedimiento se aplica con éxito al fabricar artículos que no se pueden calentar. Por ejemplo, cuando se montan envolturas para cables de teléfonos. En 1956, el tornero A. I. Chúdikov logró una unión soldada en un torno común y corriente. Hacia la pieza que giraba en el plato de torno él oprimió otra inmóvil. Los topes de las piezas se calentaron hasta el rojo vivo en unos cuantos segundos y en cuanto dejaron de girar, las piezas quedaron firmemente soldadas. Este sencillo proceso tecnológico de soldadura por fricción se logró automatizarlo con facilidad, empleándolo con gran profusión debido a su alta productividad y la posibilidad de unir metales heterogéneos. Es particularmente eficaz para producir herramientas de corte de acero blando corriente hacia el cual se suelda una plaquita pequeña cortante de aleaciones especiales caras.

Para acoplar metales con un grosor de unos cuantos micrómetros se ha elaborado la soldadura por vibraciones ultrasónicas. El extremo del útil especial de soldar transmite hacia la zona de soldadura oscilaciones mecánicas con una frecuencia de varias decenas de kilohertzios. Por efecto de las oscilaciones ultrasónicas se destruyen las películas de óxidos en las superficies a unir y éstas se calientan. Además, el extremo oprime los bordes contribuyendo así a formar el empalme.

A principios de los años 70 del siglo XX, se comenzó a emplear el ultrasonido para unir, acrecentar y cortar los tejidos vivos. Los trabajos de los soldadores, dirigidos por G. A. Nikolaev, miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, Héroe del Trabajo Socialista, en conjunto con los médicos se coronaron con gran éxito. Los

cirujanos, valiéndose de un equipo de soldadura, empezaron a acrecentar los tejidos óseos de la persona.

Se han elaborado métodos para unir metales sin fundirlos. Se trata de la soldadura heterogénea y del encolado.

Durante la soldadura heterogénea el enlace interatómico surge cuando las superficies de los bordes se mojan con el metal fundido, es decir, con la aleación para soldar.

El encolado se utiliza para aquellas aleaciones y plásticos que pierden sus propiedades al calentarlos o comprimirlos. Este procedimiento lo utilizó O. K. Antónov, famoso constructor aeronáutico soviético, académico de la Academia de Ciencias de la RSSU y Héroe del Trabajo Socialista, para crear la estructura de aviones utilizando aleaciones de aluminio de alta resistencia mecánica, pero que se someten con dificultad a la soldadura.

La fuente de calor más difundida

La soldadura moderna muchos de sus éxitos los debe a una maravillosa fuente de caldeo: la descarga en arco. A fines del siglo XIX y comienzos del XX, se inició el desarrollo de la teoría sobre la descarga en arco. Los físicos, el ruso V. F. Mitkiévich, el inglés J. Thomson, el alemán I. Stark y otros, hicieron una gran aportación en el estudio del arco eléctrico. Paulatinamente el empleo del arco se extendió mucho más en la técnica de soldadura. Este método de soldadura al arco se fomentó con particular intensidad durante los años 30-50 del siglo XX, como resultado de las investigaciones de los siguientes científicos: V. P. Nikitin, E. O. Patón, K. K. Jrénov, G. I. Pogodin-Alexeev, G. M. Tijodeev y otros, asi como muchos científicos extranjeros.

Para poder comprender en qué se basa la soldadura al arco, se precisa conocer perfectamente qué representa en sí el arco eléctrico.

Por lo común, los gases se comportan como aisladores eléctricos, por cuya razón el aire que se encuentra entre dos

placas, unidas a una fuente de corriente eléctrica, no dejará pasar dicha corriente. Sin embargo, si en el espacio entre ellas se introducen partículas cargadas, a saber, iones o electrones, comenzará a circular la corriente. El paso de la corriente a través del gas es precisamente lo que se llama descarga eléctrica.

Se conocen unos cuantos tipos de descargas: oscura, luminiscente, por chispas, en arco, el efecto corona y otros. Se distinguen entre sí por la intensidad y tensión de la corriente, por la luminiscencia, por los efectos acústicos, así como por la duración de su existencia.

El arco es una clase de descarga estable existente siendo la intensidad de la corriente desde décimas de amperio hasta miles de amperios. En nuestro tiempo, este complejo fenómeno físico atrae la atención de muchos científicos; puesto que hasta el presente el arco sigue siendo la unica fuente de energía que puede mantener durante un largo tiempo procesos de alta temperatura. Mediante el arco funcionan centrales termonucleares y motores cohete iónicos interplanetarios. Los astrofísicos simulan procesos que transcurren en las estrellas. Los químicos sintetizan diversos compuestos. Pero el arco no siempre es un ayudante: los electricistas se ven obligados a solucionar los problemas que surgen al extinguir el arco que aparece en los interruptores, pudiendo ser la causa de serias averías.

Es de gran importancia para los soldadores que el arco se pueda excitar con facilidad, sea estable y de mejor control. En esa dirección se encaminan los trabajos de los científicos que se ocupan de problemas vinculados con la soldadura al arco.

Cómo surge el arco. Se conocen unos cuantos modos para excitar la descarga en arco. Según el procedimiento de V. V. Petrov, dos electrodos se juntan hasta entrar en contacto, separándolos repentinamente a una pequeña distancia. En ese instante entre ellos estalla el arco.





La filmación rápida permite registrar los cambios instantáneos de la forma del arco, la intensidad lumínica de sus sectores individuales.

¿Cómo se puede explicar este fenómeno? De manera simplificada uno se lo puede imaginar así: cuando entran en contacto los electrodos, el circuito se cierra y por él circula la corriente. En correspondencia con la ley de Joule–Lenz, en los conductores se desprende calor. El lugar de contacto de los dos electrodos, ya que posee la mayor resistencia, se calienta con mayor intensidad y rapidez en relación con las demás partes del circuito. Siendo elevada la temperatura, comienza a evaporarse el material del electrodo, surgiendo el efecto de la llamada emisión termoiónica (termoelectrónica), consistente en que se emiten electrones bajo la acción de la excitación térmica. Si en ese instante se corta el contacto entre los electrodos, surge un campo eléctrico similar al que aparece entre las armaduras del condensador. En el cátodo, conectado al polo negativo de la fuente de corriente, se reúnen aquellos electrones que salen debido a la emisión termoelectrónica. En caso de que la intensidad del campo eléctrico sea suficiente, surge el fenómeno de autoemisión: los

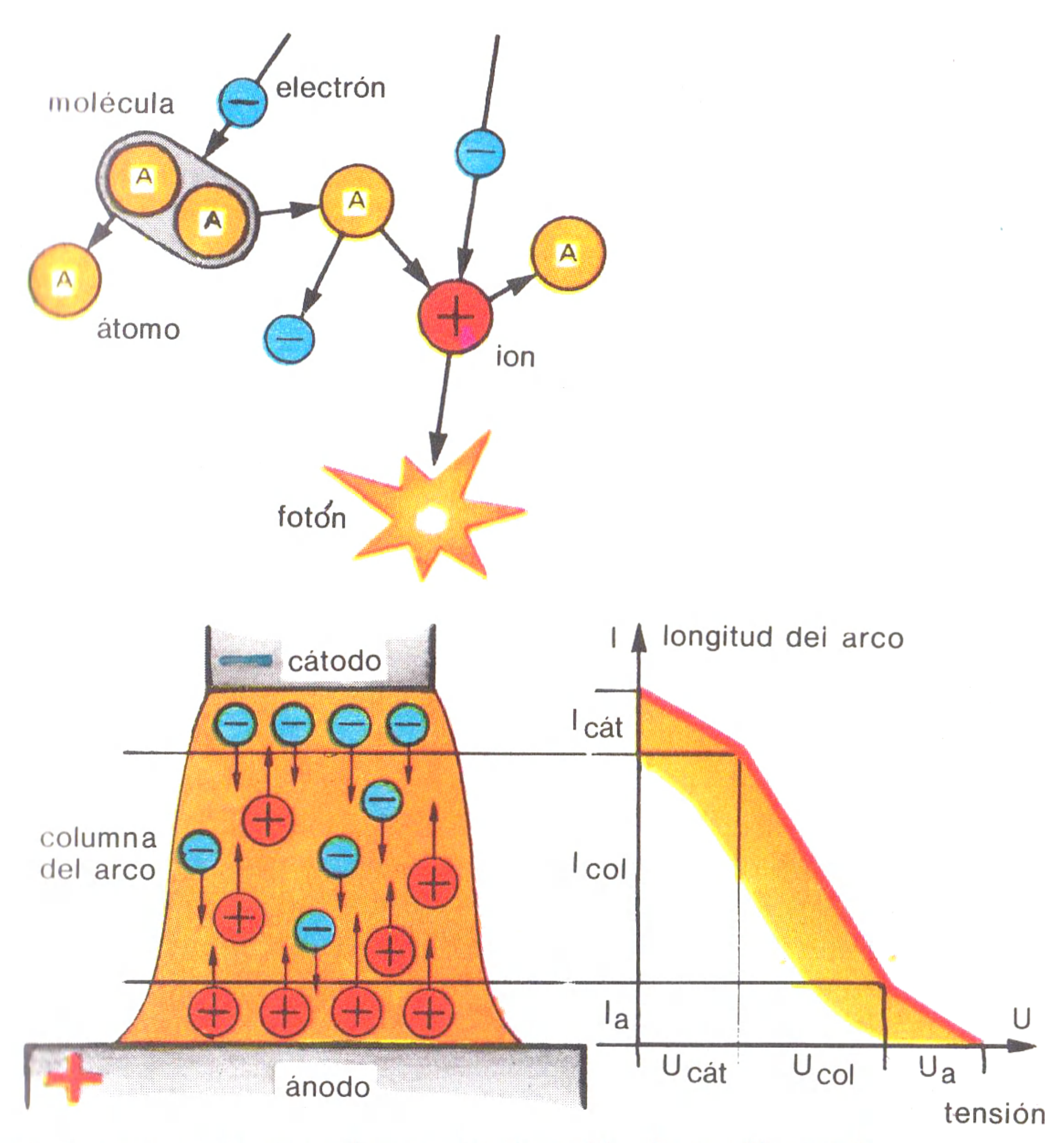
electrones se sueltan de la superficie del cátodo por efecto de las fuerzas electrostáticas.

Como resultado de estos procesos en el espacio comprendido entre los electrodos, aparecen electrones libres. Chocando con moléculas y átomos del gas, así como con el material de los electrodos evaporado, los electrones los dividen en iones y nuevos electrones (semejante fenómeno se llama emisión secundaria). En el espacio ionizado de esta manera se desarrolla la descarga en arco.

Estructura del arco. En la franja interelectródica (espacio del arco) se encuentra el canal electroconductible luminoso, llamado columna del arco. También se iluminan los extremos incandescentes de los electrodos. Según sea el brillo de la luminiscencia, podrá determinarse la temperatura. En la superficie del cátodo y del ánodo, en las denominadas manchas activas del arco, dicha temperatura alcanza valores muy elevados, bajo la cual se funden y ebullen los metales más refractarios de los electrodos. La temperatura en la columna del arco, durante la soldadura, alcanza decenas de miles de grados.

La longitud del arco rara vez supera 1–2 cm, el diámetro de la columna es todavía menor. El plasma del arco se concentra en un volumen de cerca de 1 cm^3. Pero incluso en este pequeño espacio, se pueden destacar tres zonas. Dos de ellas son limítrofes entre los electrodos y el gas ionizado, la tercera es el espacio propiamente dicho del electrodo lleno de gas ionizado. En cada una de estas zonas, los científicos han descubierto sus fenómenos particulares.

¿Qué ocurre en la columna del arco? Como ya se mencionó, la columna del arco está llena de partículas cargadas. Casi siempre también están presentes allí partículas neutras: átomos e incluso moléculas de vapores de sustancias, con las cuales se hicieron los electrodos, así como gases que rodean el arco.



El ingreso y el gasto de energía, la caída de tensión en las zonas adyacentes a los electrodos y en la columna del arco dependen del carácter de la interacción de los electrones, iones, átomos y moléculas. La caída total de la tensión en el arco es igual a la suma de tres componentes: $U_g = U_{cát} + U_{col} + U_a$. La corriente del arco está formada por la corriente de los iones y la corriente de los electrones, $I = I_i + I_e$.

Sobre el movimiento de las partículas inciden fuerzas suscitadas por la diferencia de presiones debida a la concentración irregular de las partículas, por la interacción coulombiana de los electrones e iones y por toda una serie de otras causas. Por eso, la trayectoria del movimiento de las partículas presenta una forma muy compleja. Las partículas se desplazan bajo la acción de diferentes fuerzas.

Los electrones son los que se mueven con mayor rapidez. Debido a que son pequeños y movedizos se aceleran fácilmente y al chocar con los átomos e iones les transmiten su energía. El impacto del electrón con los átomos puede ser elástico y no elástico.

En caso de choques elásticos no ocurre nada perceptible. Estas colisiones se parecen a los choques de una pelota de tenis con otra. El átomo hacia el cual fue a parar el electrón comienza a moverse más rápidamente, o sea, aumenta su energía cinética. Debido a ello se eleva la temperatura del plasma.

El culpable de los choques no elásticos es el electrón que en el campo eléctrico haya adquirido una cantidad de energía lo suficiente alta. Al chocar con el átomo lo excita, además, cuando el golpe es lo bastante fuerte, entonces el átomo desaloja sus propios electrones. El átomo se convierte en un ion positivo: de una carga, si se expulsó un electrón; de dos cargas, cuando se desalojan dos electrones; etc. La energía que deberá transferirse al electrodo para ionizar algún átomo se expresa en electronvoltios (eV) y se denomina potencial de ionización. La magnitud de éste depende de la estructura del átomo. Cuanto menor sea el número del grupo y mayor el número del período en la tabla periódica de los elementos de Mendeléiev, tanto menor energía se precisará para la ionización. El menor potencial de ionización (3,9 eV) pertenece al átomo de cesio. Es el elemento más pesado entre todos los metales alcalinos. El más ligero entre los gases inertes es el helio, elemento del último grupo, el número cero, posee el potencial de ionización máximo (24,5 eV).

La energía que se gasta para disociar distintas moléculas también difiere. Por ejemplo, para disociar una molécula de hidrógeno se necesita gastar 4,48 eV; de flúor, 1,6 eV y de gas carbónico, 9,7 eV.

Estas magnitudes tienen particular importancia para los soldadores. Al elegir el alambre para los electrodos, o el medio protector, debe tenerse en cuenta el comportamiento de muchos elementos en el arco y es importante saber qué gases se disocian antes y cuáles después; qué elementos se ionizan primero y cuáles luego; así como cuánta energía se requiere para eso.

Cuando el arco de soldadura funciona en condiciones reales, sobre el proceso de soldadura ejercen influencia las particularidades del medio que rodea el arco, los materiales con que están hechos los electrodos, etc.

Fenómenos junto al cátodo y al ánodo. Los procesos que transcurren en el plasma de la columna del arco son complejos, pero lo son aún mucho más, junto a la superficie de los electrodos. Precisamente aquí se interrumpe la corriente de electrones por el conductor metálico, es decir, por el electrodo y comienza otro tipo de corriente –la del arco– que se crea, tanto por electrones, como por iones. Se modifica el carácter de los fenómenos no sólo eléctricos, sino también térmicos. Aquí, en concreto, el plasma candente confina con la superficie, relativamente fría, de los electrodos que están tan sólo calentados a unos 2–3 mil grados. Además, el medio circundante en estas regiones transitorias es indeterminado. Se desconoce cuánto gas y cuánta cantidad de vapores del material de los electrodos contiene.

La extensión de las zonas transitorias es muy pequeña y en las condiciones habituales de la soldadura constituye milésimas de centímetro. A través de las manchas activas, al metal llega la parte fundamental del calor. El flujo térmico específico en la mancha de caldeo, para algunos

procedimientos de soldadura al arco, excede de 1000 kW/cm^2.

La zona del cátodo es un peculiar abastecedor de electrones. Las causas por las cuales se desprenden los electrones pueden ser diversas. Una de las fundamentales es la emisión termoiónica que surge a elevada temperatura. La energía que se necesita para mantener la alta temperatura del cátodo se repone por cuenta de la energía de los iones que bombardean la superficie catódica, o a cuenta de la energía de los iones de una fuente ajena de caldeo. En algunos casos, también los fotones pueden desalojar electrones a partir del cátodo.

La mancha catódica, de ordinario, ocupa una pequeña área y por eso las líneas de corriente en el arco, imaginándolas convencionalmente, es como si se contrajesen allí donde termina la columna y comienza el electrodo. Aquí se gasta la parte de energía necesaria para que ingresen los electrones primarios y para reponer el calor que se desprende del electrodo.

A diferencia del cátodo, el ánodo se bombardea constantemente con electrones que atrae desde la columna del arco. Los electrones, al golpearse contra la superficie del ánodo, lo calientan, penetran en su material y se convierten en electrones de conductividad metálica. En el ánodo, en condiciones normales, se desprende más calor que en el cátodo.

Factores que inciden sobre el comportamiento de las partículas. Cuanto más fuerte sea la intensidad del campo eléctrico entre los electrodos, tanto mayor energía éste transmite a los electrones e iones. Aumenta la intensidad de ionización y con ella varía también la densidad de las partículas conductoras de corriente eléctrica. Pero la conductividad del arco se modifica según leyes propias más complejas, que difieren de la conductividad del metal.

Además del campo eléctrico, sobre el comportamiento de

las partículas en la columna del arco, ejercen influencia muchos factores más: la difusión térmica, es decir, la tendencia de las partículas calentadas a "escaparse" en distintas direcciones; el efecto pinch, o sea, la acción del campo magnético que aparece alrededor de la columna y tiende a contraerla; la "inestabilidad" de diversos tipos; los chorros de plasma y de vapor; etc. En función de las condiciones en que exista el arco, la incidencia de estos factores puede debilitarse o viceversa, incrementarse.

El arco se encuentra con el metal

Muchos investigadores en diversos países del mundo se ocuparon en estudiar los procesos físicos que transcurren durante el calentamiento para la soldadura, las particularidades de fusión del metal en los bordes y la formación de la costura. Poco a poco, fueron descubriendo los secretos de transformación de las partes separadas del artículo en una unión sólida monolítica.

Rendimiento de la soldadura. Durante la soldadura no es obligatorio, y la mayoría de las veces es simplemente desventajoso, calentar todo el artículo. Para utilizar con la mayor efectividad el calor se necesita concentrarlo de manera que los bordes se calienten, en el más breve tiempo, a la profundidad requerida y sólo hasta una temperatura tal, con la cual sea posible la soldadura. Cuando se quiere caracterizar las capacidades "térmicas" de la fuente de caldeo para la soldadura, en primer lugar, se habla de la potencia térmica, es decir, sobre aquella cantidad de calor que se desprende al transformar la energía eléctrica, química, mecánica, o de otro tipo, en unidad de tiempo. La potencia térmica se determina mediante cálculos o ensayos.

Por ejemplo, para conocer la potencia de la descarga en arco, se mide la intensidad de la corriente en el circuito (I)

y la caída de tensión entre el electrodo y el artículo (U_g) y se ejecuta el cálculo recurriendo a la fórmula $Q = I \cdot U_g$ (W).

No obstante, no todo el calor llega a su destino. Parte del mismo se disipa en la atmósfera, otra se gasta en calentar la instalación de soldadura y los objetos circundantes. Se denomina potencia efectiva aquella parte de la potencia térmica general que se utiliza para calentar el artículo. Un índice muy importante, cuando se comparan las fuentes de caldeo, es el rendimiento efectivo que resulta al dividir la potencia efectiva entre la potencia térmica total.

El rendimiento efectivo para diferentes tipos de soldadura varía en función de las particularidades de la tecnología, de la profundidad de fusión y de otras condiciones. Así por ejemplo, el rendimiento efectivo para la soldadura al arco varía desde 0,5 hasta 0,9; para la soldadura por llama de gas, desde 0,25 hasta 0,7.

Cómo se gasta el calor. El rendimiento efectivo, como ya se mencionó, es un índice importante del proceso. Esta magnitud deberá conocerse para calcular las deformaciones de las estructuras soldadas, determinar las zonas de calentamiento y para muchos otros fines. Pero las fuentes de calor poseen también otras particularidades que obligatoriamente se considerarán al elegir el método de soldadura:

Según el grado de concentración del calor, la densidad del flujo térmico en la mancha de calentamiento (cal/cm$^2 \cdot$s, o W/cm^2), y la máxima potencia térmica que se suministra al artículo (W), se puede juzgar qué grosor del metal se podrá unir. Así por ejemplo, la llama oxiacetilénica asegura la densidad del flujo térmico hasta de 500 W/cm^2, mientras que el arco eléctrico, 30 000 W/cm^2, además si tenemos en cuenta que la máxima potencia térmica introducida en el artículo constituye 10 000 W para la llama y 100 000 W para el arco, entonces resulta evidente que la capacidad de fusión de este último es considerablemente más alta.

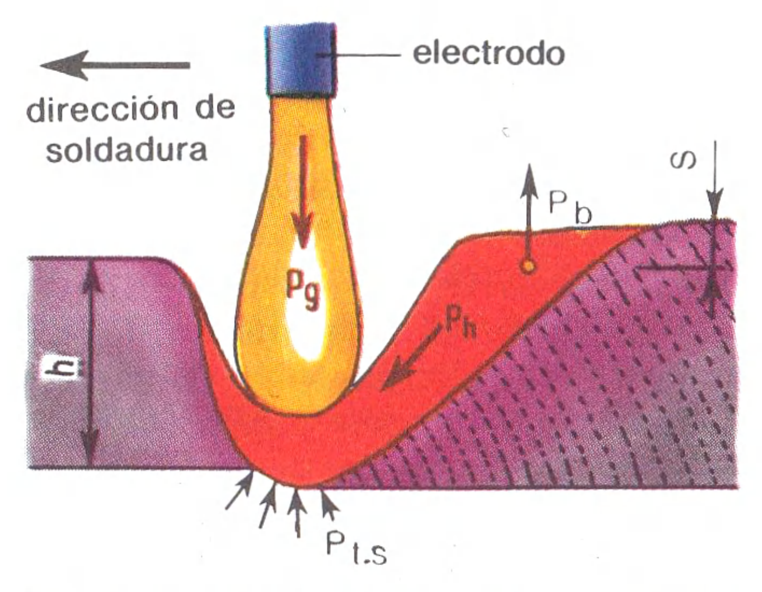
Surge el interrogante: ¿Para qué hace falta la soldadura

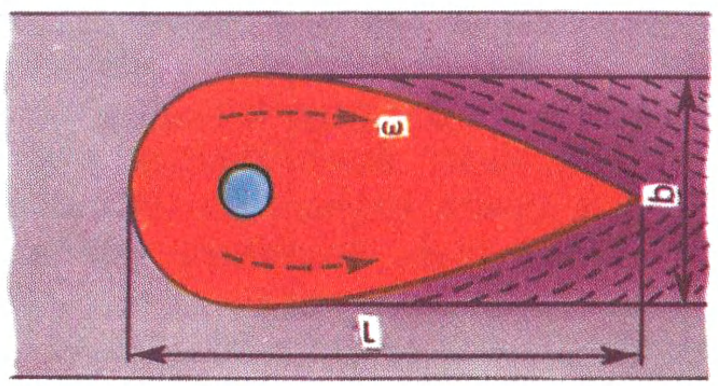
por llama de gas, si tiene un bajo rendimiento, la densidad de su flujo térmico es la más baja y además posee una potencia térmica no elevada?

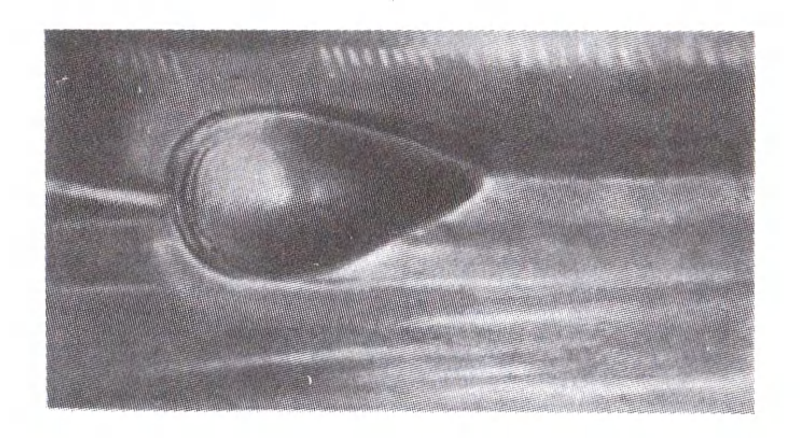
La recomendación de soldar todo por medio del arco, puesto que es más efectivo, no carece de sentido teórico. Pero he aquí que la práctica, el apreciador más severo, plantea ante los procedimientos de soldadura los más variados requisitos. Y suelen suceder muchos casos en que otras propiedades resultan ser más importantes que las características térmicas.

Como se sabe, a comienzos del siglo XX, la soldadura al arco no aguantó la competencia que le oponía la joven soldadura por llama de gas: el procedimiento de N. N. Benardos no garantizaba la calidad satisfactoria del metal en la costura, mientras que el procedimiento de N. G. Slavianov, no poseía la suficiente flexibilidad tecnológica y maniobrabilidad. Unicamente después de introducir mejoras esenciales, los métodos de soldadura al arco pasaron a ocupar el primer lugar en cuanto a su aplicación. Se consiguió mejorar el proceso de soldadura al arco, como consecuencia de las más variadas investigaciones en los procesos de fusión y cristalización en el baño de soldadura.

Un baño lleno de hierro fundido. Durante la soldadura por fusión, la fuente calorífica funde el metal en un sector aislado del empalme. Se conforma una especie de laguna (baño) rodeada por la superficie del metal sin fundir. La fuente de calor (arco, llama, haz electrónico, haz de láser) "oprime" el metal en el baño desalojándolo desde el centro hacia los bordes formando una cavidad, llamada cráter. Al desplazar la fuente de calor, el metal fundido se aparta al extremo posterior del baño, o sea, hacia la cola. Allí transcurre la cristalización y se forma la costura. Mientras tanto, el arco simultáneamente "socaba" la parte delantera, el cabezal del baño, fundiendo nuevas y nuevas porciones de metal.







La presión de la columna del arco (P_g) se equilibra por la presión hidrostática (P_h) del metal fundido que se desaloja hacia la cola del baño. Siendo la fusión de parte a parte, el metal fundido se mantiene desde abajo por las fuerzas de tensión superficial ($P_{t.\,s}$). La forma del baño y de la costura se caracterizan por la anchura (*b*), profundidad de fusión (*h*), longitud del baño (*L*), altura del recrecimiento (*S*),

El metal fundido del baño se mezcla ininterrumpidamente. Siendo constantes la velocidad, la potencia térmica de la fuente calórica y demás parámetros del régimen, la forma y las dimensiones del baño de soldadura quedan invariables. El carácter de la cristalización, la posibilidad de que aparezcan defectos, la distribución de impurezas y otros muchos fenómenos que influyen sobre la calidad del metal en la costura, dependen de la forma del baño y de sus índices. Para controlar los mencionados fenómenos hay que analizarlos.

Sobre el metal fundido actúan distintas fuerzas. Estas dependen de las propiedades de la fuente calórica, de las propiedades termofísicas del metal sujeto a soldadura, del régimen de soldadura, así como de otros parámetros. No resulta fácil experimentar directamente durante el propio proceso de soldadura. Imagínense, por ejemplo, el siguiente problema. Sea dado: un arco brillante de más de mil grados de temperatura, que volatiliza todo, bajo el cual bulle el acero fundido. Se requiere hallar la temperatura del acero en un radio de 5 mm respecto al eje del arco y a una profundidad de 3 mm desde la superficie, al cabo de 2 s después de haber excitado el arco.

Los científicos resolvieron con éxito ésta y otras tareas. Se cumplieron multitud de mediciones con ayuda de termopares y calorímetros, se elaboraron métodos de cálculo, tablas y gráficos. Hoy día, los soldadores pueden determinar no sólo la temperatura en cualquier punto del baño, sino también la temperatura media de todo el baño, su contenido calorífico (entalpía), el volumen, la velocidad de enfriamiento y demás parámetros del mismo. Por lo que se refiere a nuestro problema, la circunferencia de radio igual a 5 mm

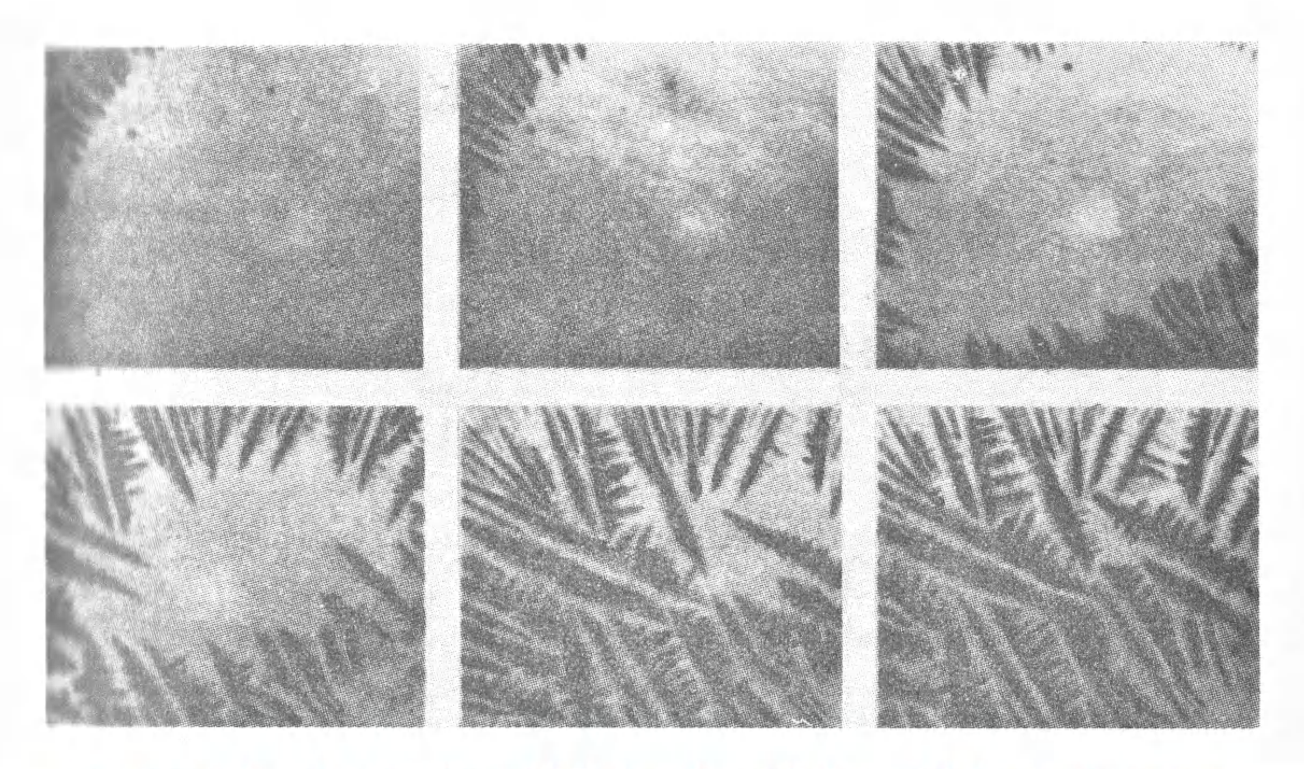
coeficiente de la forma de penetración (b_p) y por otros índices. La forma del baño, visto desde arriba, es parecida a la de una gota incidente: su cola tiene forma alagrada y aguda, mientras que la parte delantera, tiene aspecto de semicírculo.

se encuentra en el baño y la temperatura allí es cerca de 2300°C.

Estudiando el baño y las costuras, los soldadores establecieron regularidades muy importantes. Conociendo que la profundidad de fusión es proporcional a la potencia térmica del arco, se puede calcular el régimen aproximado de soldadura para piezas de determinado grosor. En dependencia semejante se encuentra también el volumen del baño de soldadura que varía, para diferentes métodos de soldadura por fusión, desde décimas hasta unas cuantas decenas de centímetros cúbicos.

Para calcular procesos metalúrgicos y para otros muchos fines, es de excepcional importancia conocer cuánto tiempo el metal se encuentra en estado líquido. Este tiempo, en distintos sectores del baño, es diferente. Al borde del baño, cerca de los límites de soldadura, el metal se cristaliza con rapidez, pero cuanto más se aleje del borde, tanto más tardará el metal en solidificarse, tanto más tiempo se mantendrá en estado líquido.

En caso de soldadura al arco y por llama de gas la "vida" del metal fundido en el baño dura fracciones o unidades de segundo, mientras que cuando se trata de soldadura eléctrica bajo el lecho de escoria, es de minutos. Durante este tiempo el metal entra en acción con las partículas de escoria y burbujas del gas, introducidas al baño o formadas en él. Es evidente que si la escoria o el gas se "estancan" en el metal, estropearán la costura, o sea, reducirán su resistencia mecánica y plasticidad, además pueden alterar la hermeticidad. La tarea del soldador consiste en desembarazarse de las impurezas indeseables. Aunque al solucionar esa tarea se tropieza con muchas dificultades, la naturaleza previó varios fenómenos que si se utilizan correctamente facilitan el cumplimiento de la misma. Por ejemplo, sobre la escoria y los gases actúa una fuerza expulsora, puesto que sus densidades son menores que la densidad de los metales. Esa fuerza está dirigida en sentido opuesto a la fuerza de gravedad. Por



Proceso de cristalización del baño de soldadura. El intervalo entre las imágenes es de 0,2 s.

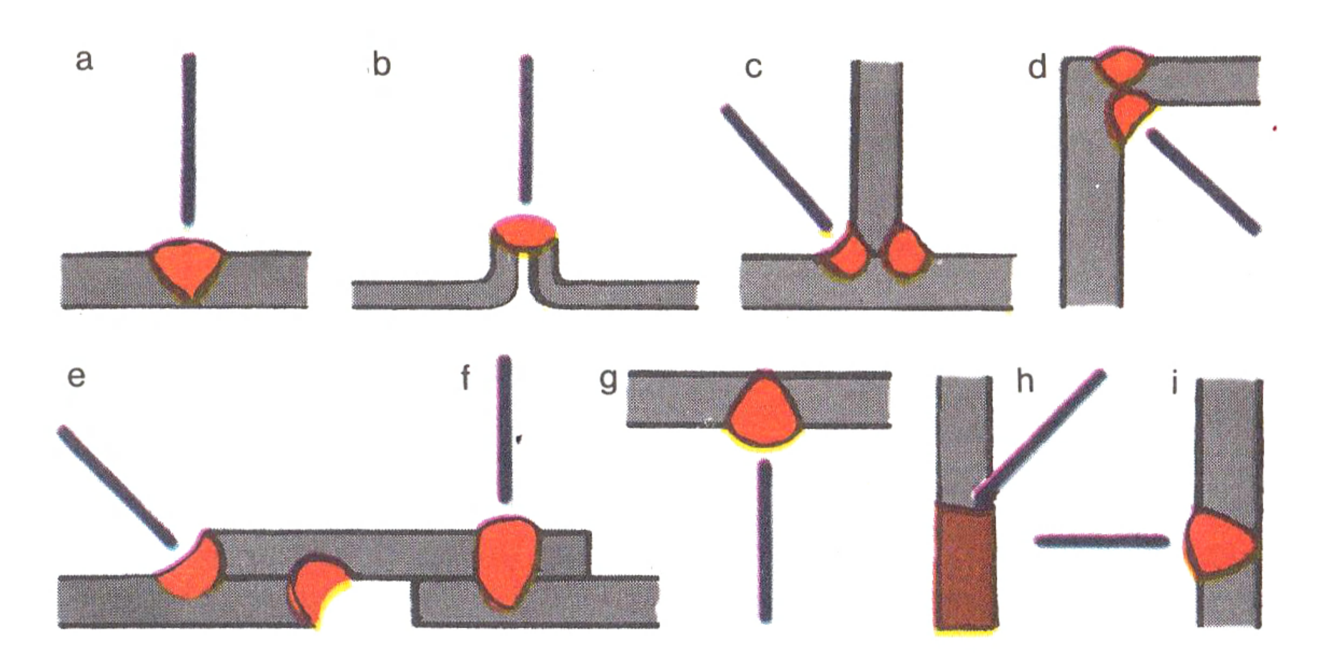
lo cual, si el baño se encuentra en posición inferior, entonces las inclusiones de escorias y poros tenderán a flotar. Tan sólo hace falta ayudarles a vencer las fuerzas que se oponen a su flotación.

El metal líquido se solidifica. Los metales y las aleaciones en estado sólido son cuerpos cristalinos. ¿Cómo se cristaliza el metal en el baño?

Las partículas de metal fundido, a medida que disminuye la temperatura, se vuelven menos móviles. El calor del baño se disipa hacia las paredes. Entre el metal sólido de las paredes y la capa cristalizante se establecen enlaces cristalinos corrientes, se forman cristalitas comunes que crecen a cuenta del acoplamiento del metal líquido vecino. Semejante "recrecimiento" de los cristales transcurre desde los bordes en dirección al centro y desde la cola hacia el cabezal del baño. Ya que primero se solidifican los

componentes más refractarios, en el baño todo el tiempo aumenta el porcentaje de los componentes fusibles. El proceso de cristalización culmina a temperatura más baja que aquella en que comenzó.

Ustedes ya saben que los cristales en el baño común de soldadura se encuentran hacia el centro de la costura, por consiguiente, los elementos en la misma "están obligados" a distribuirse irregularmente: cerca de los límites de la fusión con el metal básico se reúnen los más refractarios; en el centro, los fusibles. Las propiedades de la aleación dependen de su composición. A veces, propiedades tan importantes como lo son las resistencias mecánica y a la corrosión, pueden cambiar bruscamente, a saltos, debido a una modificación insignificante de la composición. Por esta razón no deberá permitirse la distribución arbitraria de los elementos a lo largo de la costura, al soldar estructuras altamente cargadas. Una concentración desfavorable, incluso en un solo sector, puede poner fuera de servicio todo el artículo. Por esta causa los científicos se ven obligados a calcular e investigar la composición local del baño y de la costura,



Costuras soldadas y sus posiciones durante la soldadura.

aprender a controlar el carácter de la cristalización. Algunos elementos son capaces de "redistribuirse" incluso en el cristal solidificado. Por ejemplo, al soldar aceros, al carbono, que posee gran movilidad difusiva (sobre todo a elevadas temperaturas), le da tiempo a igualar su concentración en el tiempo en que enfría la costura. También existen elementos que, sin esperar a que el frente de cristalización llegue hasta ellos, comienzan de por sí a cristalizarse, formando sus propias dendritas en aquellas partes del baño donde aún no les corresponde estar. Con frecuencia dichos elementos, llamados inoculantes, se emplean especialmente para afinar la estructura. Por ejemplo, al soldar aleaciones de aluminio, como inoculantes sirven el titanio y el circonio. Hay elementos que imposibilitan el crecimiento de los cristales, envolviendo cada uno de ellos con una finísima capa, mientras tanto en la fundición se engendran y crecen nuevas dendritas.

También altera las leyes de cristalización la solicitación mecánica. Por ejemplo, con ayuda del ultrasonido se pueden crear centros adicionales de cristalización y afinar la estructura. Asimismo, inciden sobre el baño las fuentes calóricas y las condiciones de termodisipación. Y claro está, sobre la forma y dimensiones de las cristalitas ejercen influencia las condiciones de calentamiento y termodisipación.

Clases de uniones soldadas y tipos de costuras. En las condiciones reales de producción, el baño de soldadura puede ocupar diferentes posiciones en el espacio. Fíjense en la figura: la soldadura puede ejecutarse en posición inferior (a, f), en posición de techo (g), en el plano vertical o inclinado (h, i).

Es evidente que conviene más tratar con costuras inferiores. No obstante, no todos los artículos se pueden girar para colocarlos en la posición cómoda de soldadura. Cuando se sueldan barcos, armazones de edificios, juntas de cañerías, frecuentemente el baño queda en posición invertida.

Según la disposición recíproca de los elementos a soldar, existen varios tipos de uniones. Unión a tope (a). Puede formarse tanto con elementos de un mismo grosor, como de diferentes espesores. Las costuras en semejante unión se llaman costuras a tope. A veces, cuando se sueldan hojas delgadas, sus extremos se rebordean previamente (b). Para las uniones en T (c) y en ángulo (d), los elementos se ensamblan en forma de las letras T y L invertida. El ángulo entre el ala y la pared puede ser tanto recto, como ser diferente de 90°. También puede ser diversa la combinación de grosores. Las costuras en semejante unión se llaman angulares.

En la unión de solapa (e) una hoja se coloca sobre otra. Esta unión puede realizarse por costura angular, soldando uno de los bordes; también puede hacerse con costura por puntos fundiendo la hoja superior (con arco o haz electrónico) o bien, formando puntos o una costura continua por la parte interna, entre las hojas aplicando la soldadura por contacto, en frío y otros procedimientos.

De ordinario, la elección del tipo de uniones soldadas y de costuras depende de la estructura del artículo. Una vez elegida la costura, en función del tipo de ésta, del grosor de la unión, de las propiedades del metal, del equipo de que se disponga y de otras condiciones, se fijan los procedimientos y regímenes de soldadura. Los proyectistas que diseñan el artículo y los tecnólogos, que elaboran el proceso tecnológico para la fabricación del mismo, deberán tener en cuenta diversos factores a fin de encontrar la solución óptima

La soldadura "estropea" el metal

Peldaños del mejoramiento. La soldadura, a pesar de su superioridad en cuanto a maniobrabilidad y productividad, hasta fines del siglo XIX, no logró aventajar de manera notoria al remachado. Con ayuda de este último se seguía ensamblando el revestimiento de los barcos, las paredes

y fondos de calderas, las vigas de puentes y torres, etc. A la soldadura se le atribuía el papel de fabricante de construcciones metálicas secundarias y artículos poco cargados. El nuevo proceso tecnológico no siempre aseguraba buena calidad de los empalmes. En aquel entonces tan sólo algunos entusiastas apoyaban la soldadura. El hallazgo de soluciones afortunadas se implantaba en la práctica, sirviendo como peldaño de turno en el ulterior auge de la producción que se vale de la soldadura.

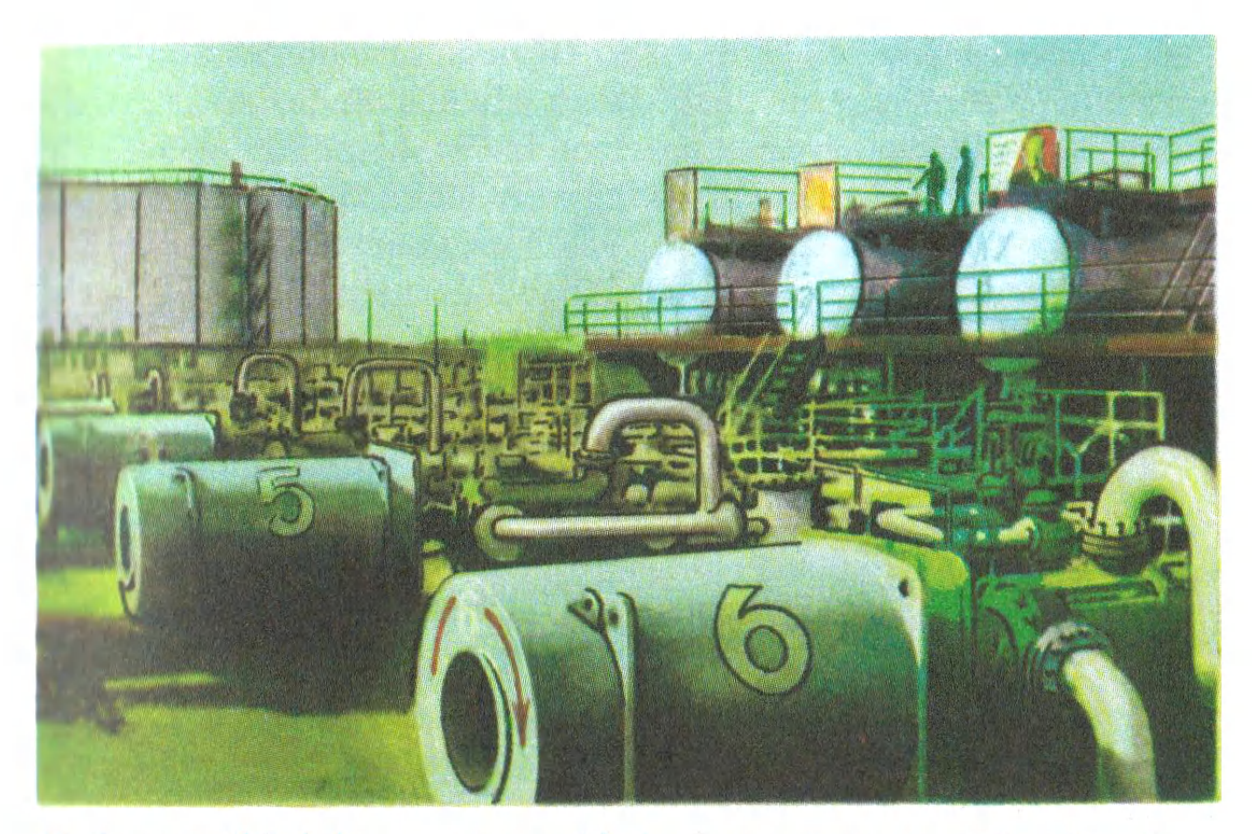
Uno de estos peldaños se jalonó con la idea del ingeniero sueco O. Kelberg. En el año 1907, propuso recubrir los electrodos metálicos fundibles con materiales termorresistentes no electroconductibles. Aunque la idea de Kelberg consistía en que los recubrimientos refractarios deberían evitar el escurrimiento del material de los electrodos, al ejecutar la soldadura en posición en techo, resultó que el revestimiento en cierta medida protegía el metal fundido contra la penetración del oxígeno y del nitrógeno contenidos en el aire. En el año 1917, los científicos norteamericanos O. Andrus y D. Stresa inventaron un nuevo electrodo. Su varilla de acero se envolvía con una cinta de papel encolada con silicato sódico, es decir, vidrio líquido. El papel se constituyó en fuente de humo que apartaba el aire de la zona donde se ejecutaba la soldadura, de la misma manera en que Benardos, con ese mismo fin, suministraba especialmente gas. Se puso al descubierto otra propiedad interesante del nuevo revestimiento: el arco se excitaba de inmediato, al primer toque, y no se apagaba, como ocurría antes, al alargarse insignificantemente. Se debía esto a la presencia del sodio en el recubrimiento. Esto fue de gran importancia para los soldadores, puesto que antes se veían obigados a mantener en suspenso la mano con el electrodo, durante unas cuantas horas, conservando invariable una pequeña holgura (de unos cuantos milímetros) entre el extremo fundible del electrodo y el baño de soldadura.

Con los esfuerzos mancomunados de los, inventores de

muchos países: científicos, ingenieros y obreros, se impulsaron investigaciones con el fin de mejorar la calidad del metal de la costura, empleando la soldadura manual al arco. Hacia finales de los años 20 del siglo XX, los electrodos revestidos tenían sustancias gasificadoras especiales (en lo fundamental, orgánicas) que alejaban el aire de la zona de soldadura; sustancias aleadoras (en lo primordial, ferroaleaciones) que mejoraban la composición y estructura del metal de la costura; minerales escorificantes (arenas, óxido de titanio y otros) que participaban en la aleación, protegían el baño en cristalización y la costura en enfriamiento; y, por último, sustancias estabilizadoras con bajo potencial de ionización. Ya se podía obtener un revestimiento con propiedades tecnológicas especiales, variando la composición de los ingredientes, por ejemplo, que posean elevada fluidez en estado líquido, se fundan con facilidad y tengan otras propiedades imprescindibles para una soldadura exitosa bajo las más diversas condiciones.

Exitos y fracasos. Durante la tercera década del siglo XX, construcciones soldadas de gran envergadura para aquellos tiempos (tanques, calderas, armaduras, barcazas), se fabricaron en la Unión Soviética, en el Lejano Oriente, bajo la dirección de V. P. Vologdin que organizó un centro técnico para popularizar, difundir e implantar la soldadura.

En el destino de la soldadura jugó un papel especial el entusiasmo de los komsomoles constructores de las grandes empresas metalúrgicas de Kuznetsk (Kuzbás) y de Magnitogorsk en los Urales. Fueron aquellas construcciones importantísimas para el joven Estado Soviético. Éstas estaban orientadas a elevar el nivel de producción en la rama del metal, con el fin de mantener la independencia económica. El ritmo de la construcción superaba todo lo previsto, siendo muy difícil conformarse con que la cantidad ingente de conductos de aire y gasoductos era necesario remacharlos, según lo proponían los asesores de firmas



En la actualidad, las costuras soldadas unen centenares de miles de estructuras fabriles en muchos países del mundo.

americanas, basándose en la experiencia acumulada por la construcción industrial en EE. UU. Los komsomoles de la empresa metalúrgica de Magnitogorsk no se dejaron amedrar por el hecho de que se careciera de experiencia mundial y de que los asesores se negasen a garantizar un funcionamiento sin averías del alto horno. Se dirigieron al ingeniero en jefe de la obra I. P. Bardin, consiguiendo que permitiera realizar la soldadura de una muestra experimental. Las pruebas hidráulicas mostraron que ¡el tubo soldado resultó ser de mayor resistencia mecánica, comparado con el tradicional remachado! Además, la soldadura redujo considerablemente el tiempo necesario para los trabajos de montaje.

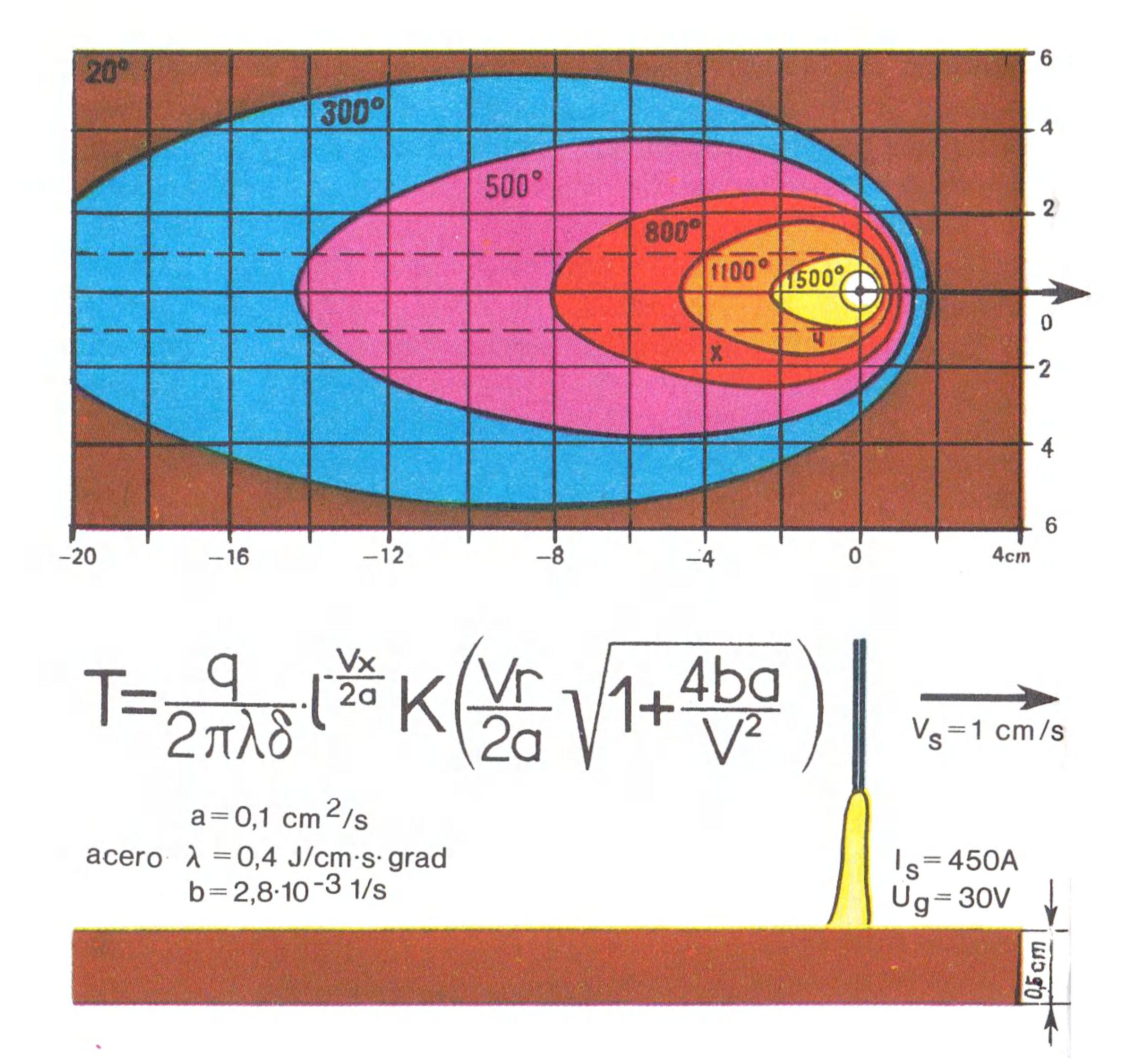
Transcurrían los años 30. Calderas y barcos, armazones de edificios, piezas de puentes, automóviles y vagones... el diapasón de estructuras soldadas aumentaba y parecía que nada podía detener la marcha ascendente de la soldadura.



Pero una cierta vez... Resulta difícil citar la fecha exacta, pues también antes, de cuando en cuando, se registraban averías de diversa envergadura en las estructuras soldadas (lo mismo que en las remachadas). Sin embargo, en los años 1938–1939, de manera inesperada se derrumbaron unos cuantos puentes en Europa Occidental. Se trataba de que sus vigas habían sido soldadas. En ese mismo período, tanto en la URSS, como en otros países, miles de vagones ferroviarios se ponían fuera de servicio, debido a las fisuras que aparecían en los bastidores y bogies soldados. Comenzaron minuciosas investigaciones. ¿A qué resultados llegaron los científicos?

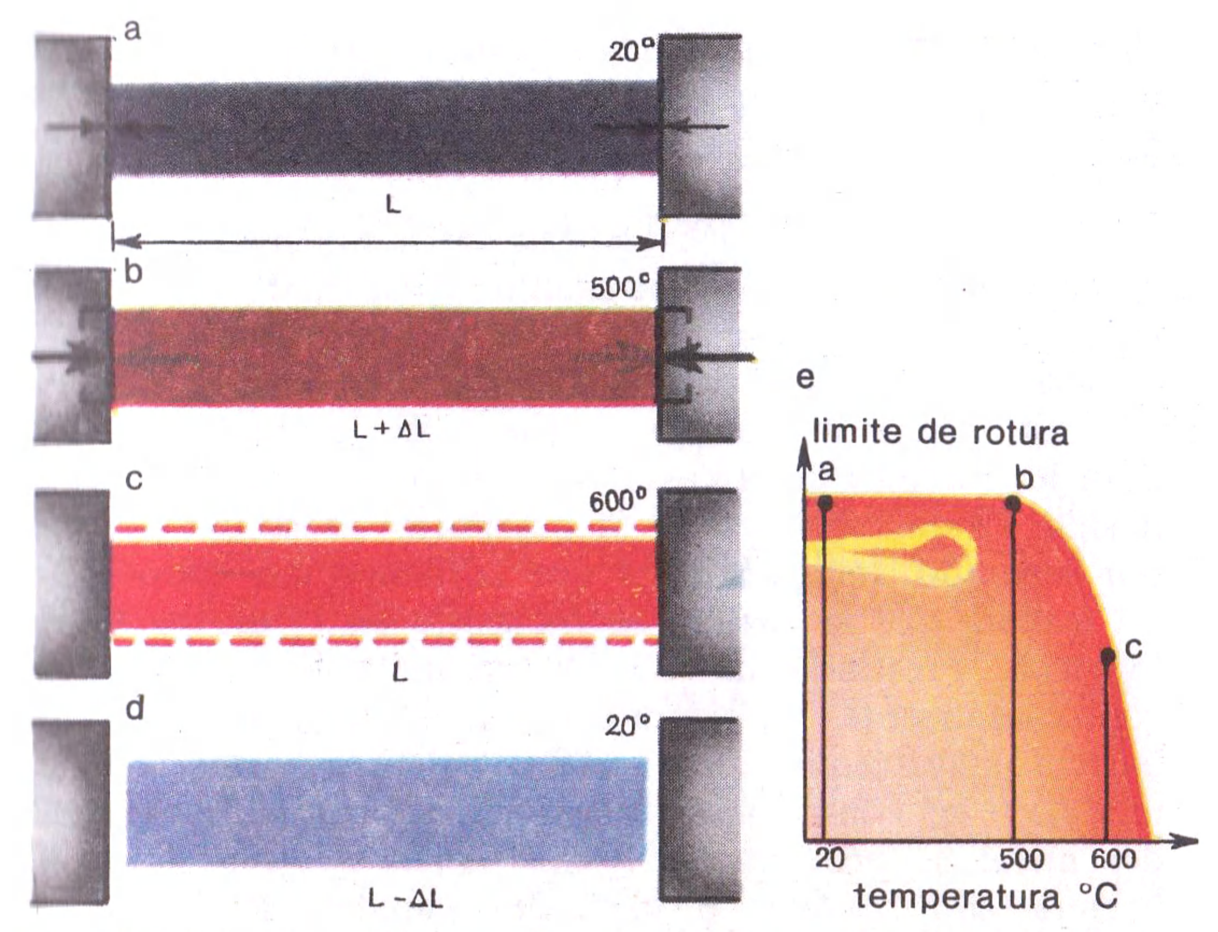
Campos de temperatura en movimiento. Durante la soldadura, la temperatura, desprendida por la fuente de caldeo para soldar, se gasta no sólo con el fin de fundir el metal del baño. Calienta también las escorias y los gases circundantes. Además, junto con el baño, se calienta el propio artículo. Con la particularidad de que se calienta irregularmente: en las inmediaciones del baño casi hasta la temperatura de fusión, mientras que cuanto más lejos del baño, tanto más baja será la temperatura. Esta, cuando transcurre el movimiento de la fuente calórica, varía de continuo: en las zonas del artículo adyacentes al baño, primero, aumenta bruscamente y después disminuye. Otro cuadro distinto se observa en los lugares alejados de la zona de soldadura: el calor llega hacia allí con retardo, la temperatura va elevándose paulatinamente y desciende con lentitud como resultado de la disipación del calor al medio ambiente.

A consecuencia del calentamiento irregular, los artículos sujetos a soldadura se encorvan, o sea, se deforman, en el metal surgen tensiones internas. Muchas aleaciones de hierro y de metales no ferrosos modifican su resistencia mecánica y ductilidad al calentarlos por encima de temperaturas determinadas. Es más, con frecuencia estas propiedades dependen también de la velocidad de enfriamiento (como



El calentamiento del artículo a soldar se caracteriza por las isotermas, que son las líneas que unen los puntos de una misma temperatura.

Las isotermas, por lo común, se pueden trazar a base de los datos obtenidos midiendo directamente la temperatura con termopares o calculados recurriendo a fórmulas. La temperatura de calentamiento de cualquier zona de la placa se puede hallar poniendo en la ecuación los valores de sus coordenadas.



En calidad de ejemplo que explica el mecanismo de acortamiento de la costura se ha tomado una barra, calentada uniformemente a toda su longitud. Puesto que las paredes inmóviles obstaculizan el alargamiento de la barra, en ésta surgen tensiones de compresión. Cuando la temperatura aumenta, la resistencia del metal a la compresión disminuye. Al alcanzar la temperatura crítica, la barra no soportará la tensión y se comprimirá en la magnitud $\Delta\alpha$. El esfuerzo, provocado por la tendencia al alargamiento, y las tensiones internas desaparacerán de inmediato. Después de enfriarse, la barra resultará más corta que al comenzar el experimento, en la magnitud $\Delta\alpha$.

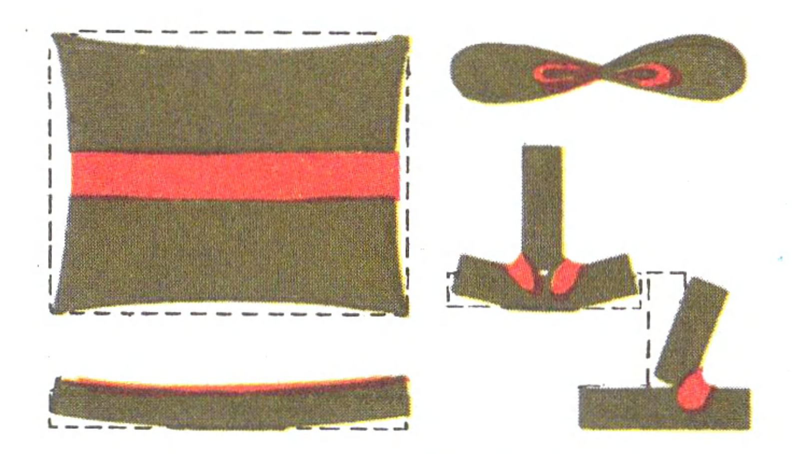
ocurre durante el temple de aceros). He aquí por qué es tan importante conocer las variaciones de temperatura en las distintas zonas del artículo sometido a soldadura. Una sección especial de la ciencia sobre soldadura se ocupa de estas cuestiones. La tarea más importante de esta sección consiste en calcular los campos de temperatura. En la

elaboración de los fundamentos térmicos de la soldadura el papel rector corresponde a los científicos soviéticos y, en primer lugar, al académico N. N. Ricalin.

Una fuerza que rompe vigas de acero. Lo que ocurre con el metal al calentarlo lo sabe cualquiera: se dilata. ¿Pero si el trozo de metal se encuentra oprimido entre mordazas de manera que no pueda alargarse?

Precisamente en esa posición se hallan durante la soldadura los sectores de la costura y las zonas colindantes a la misma. Examinemos cómo se comporta un sector tomado por separado. Imaginémonos que cortamos una barreta de tal manera que la costura se encuentre en el centro de su longitud. Prescindiendo de los campos de temperatura, condicionalmente, consideramos que el arco calentará la barreta uniformemente hasta 600°C. Además, para acercar el modelo a las condiciones reales (bajo las cuales los sectores del metal se encuentran ligados entre sí), colocamos la barrera entre sólidas e inmóviles paredes. Pues en los artículos reales, los sectores del metal están ligados entre sí y no tienen posibilidad de desplazarse por separado.

El metal, al calentarse, tenderá a alargarse. Sin embargo, nuestro modelo (y por cierto, el metal real en el sector de



"La costura contrae (encoge) el metal". Las placas rectangulares, después de la soldadura, se contraen hacia el centro. En otras uniones también tienen lugar deformaciones.

soldadura) no tiene hacia adonde alargarse, ya que lo impiden las paredes, entonces el metal comienza a "sentir" el esfuerzo compresor proveniente de las paredes que éste tiende a distanciar (b). Al mismo tiempo, el metal calentado se hace más dúctil y, cediendo a la compresión, se chafa (c). Deja de oprimir las paredes y, cuando comienza a enfriarse, se acorta en la misma magnitud en que no pudo alargarse (d). Pero si las paredes no permiten que la barreta se acorte con libertad, si la retienen, entonces en la misma aparecerán tensiones de tracción. Así ocurre también en las condiciones reales de soldadura, puesto que aquellos sectores del artículo que no fueron calentados hasta el estado dúctil y mantuvieron su rigidez, obstaculizan el acortamiento del metal en la zona colindante a la costura. Pero incluso los mismos sectores adyacentes a la misma no quedan en deuda, pues tienden a comprimir el metal próximo a ellos. Este complejo cuadro de deformaciones y de tensiones internas se complica cuando se sueldan costuras cruzadas, se fijan las piezas brutas antes de realizar la soldadura, se calientan de antemano y enfrían los artículos. Las estructuras soldadas se tuercen, encorvan, abultan mucho antes de que se pongan en servicio y soporten la carga de trabajo. Las tensiones de tracción o compresión, que aparecen a causa de la soldadura, se adicionan a las tensiones provocadas por la carga externa.

Sin embargo, los soldadores no aguardan a que el artículo se deforme, ni mucho menos, a que se destruya. Los especialistas, por anticipado, pueden calcular las tensiones y deformaciones, proponer recomendaciones para luchar contra ellas.

Grietas térmicas. Ahora ustedes ya saben: el metal en la zona de soldadura y la propia costura soldada, al enfriarse, como regla, tienden a acortarse y si en alguno de los sectores (allí donde la estructura sea muy rígida) eso es imposible, surgen tensiones internas de tracción. ¿Recuerdan cómo se cristaliza el baño? En él coexisten al mismo tiempo las fases

líquida y sólida. La fase líquida se "empuja" hacia el centro, donde se enriquece con componentes de elevada fusibilidad. Pero he aquí que llega el instante cuando los cristales sólidos casi contactan y entre ellos quedan finas intercalaciones de líquido, a veces ya aisladas. Semejante metal bifásico posee la mínima ductilidad. Basta con que surjan tensiones de tracción, para que las cristalitas, que aún no están, entrelazadas, comiencen a separarse, mientras tanto, el líquido de las intercalaciones no será suficiente para llenar la brecha surgida.

El proceso que conlleva a la aparición de fisuras de cristalización, no siempre se nota a simple vista, pero sus peligrosas consecuencias suelen ser del dominio público. Aún menos perceptible es el proceso de formación de grietas que surgen durante la reestructura de los límites cuando tiene lugar la granulación del metal ya solidificado. Las grietas de ambos tipos se denominan térmicas, puesto que surgen en el metal caliente.

Siguiendo la metodología clásica para la solución científica de un problema técnico (investigación del proceso – determinación de causas – búsqueda de medidas para combatirlas), podemos resumir la segunda etapa y concluir: existen por lo menos dos causas, a saber: las propiedades del metal y las excesivas tensiones durante la soldadura. De aquí se infieren los métodos para excluir las grietas térmicas: elección de un metal con elevada capacidad para hacer frente a los defectos y elaboracion de procedimientos tecnológicos que excluyan las cargas indeseables.

Estas recomendaciones puramente teóricas y científicas, al implantarlas en la producción, deberán coordinarse con multitud de otros requisitos, condiciones, y recomendaciones, que con frequencia se excluyen entre sí, como por ejemplo, la elección del metal. Para facilitar la elección existe incluso una característica especial, la llamada resistencia (estabilidad) tecnológica del metal para la soldadura, es decir, la capaci-

dad del metal de la costura, o de la zona colindante, a soportar sin destruirse las deformaciones elastoplásticas a elevadas temperaturas en el proceso de soldadura. Supongamos que se precisa construir un puente de acero. Es natural que usted decida elegir un metal con buena estabilidad tecnológica. Además, usted sabe que, siendo elevado el contenido de azufre en el acero, se pueden excluir las grietas térmicas. Pero no se apresure demasiado a recomendar este metal, ni mucho menos emprender la soldadura. Por cierto, la soldadura transcurrirá sin incidentes, sin embargo, cuando la costura se enfríe, su resistencia resultará tan baja que las vigas del puente quizá no puedan soportar su propio peso. Soldar será fácil, no obstante, no se conseguirá satisfacer los requisitos de servicio. Verdad es que en muchos casos aceptar o rechazar una u otra composición suele ser aún más complicado. Las aleaciones contienen muchos aditivos, por lo tanto, la incidencia negativa de un elemento puede compensarse por la influencia positiva de otro, incluso con el cambio de la cantidad de un mismo elemento, las propiedades de la aleación pueden variar bruscamente.

Por lo que respecta a la segunda recomendación, elaborar los procedimientos tecnológicos –, la cosa no es más sencilla. Por ejemplo, en costuras estrechas de profunda fusión es más probable que se formen grietas que en las costuras anchas, pero al mismo tiempo, al soldar costuras anchas se gasta más anergía y metal de aportación, surgen deformaciones y tensiones mayores, aumenta la zona que pierde la resistencia mecánica.

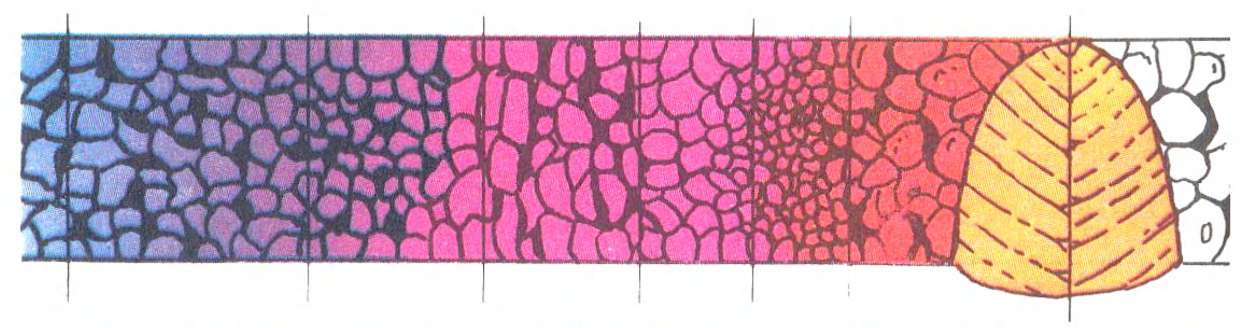
Los científicos, a fin de facilitar la elección del metal y de la tecnología, propusieron una característica especial: la soldabilidad.

En este concepto se sintetiza cómo se comporta el metal tanto durante la soldadura, como después de ella; su fiabilidad en la explotación y la economicidad de la soldadura.

La soldabilidad se evalúa a base de los resultados obtenidos en pruebas especiales. Es de lamentar que hasta el

presente los científicos no consigan ponerse de acuerdo para implantar una metodología unificada y elaborar índices cuantitativos comunes, puesto que esta característica integrada resulta muy compleja. Es más, las tareas que se plantean a las pruebas suelen ser diversas: determinar las propiedades de una nueva aleación para construcciones; la utilidad de una nueva tecnología de soldadura o montaje; investigar las propiedades de un nuevo material de soldadura.

Poros e inclusiones. La cristalización de la que hablamos, aunque de cuando en cuando culmina con grietas térmicas, a pesar de todo transcurre no del todo mal. Suele suceder que en el período de cristalización de repente comienza una fuerte formación de gases como resultado de la interacción de los diversos componentes que se encuentran en el baño y el medio ambiente que lo rodea. Además a esto se añade la capacidad de los metales para disolver bien los gases en estado líquido y mal, en estado sólido. Con la particularidad de que el tránsito del "bien" al "mal", frecuentemente, transcurre a saltos. Por ejemplo, la solubilidad del hidrógeno y del nitrógeno – gases que pueden fácilmente ir a parar al metal desde el aire y los vapores de agua – en el hierro a la temperatura de cerca de 1500°C, cambia de repente 3-4 veces. Las burbujas de gas se expulsan del metal precisamente en la zona de cristalización. Sin embargo, cuan-



Estructura de la zona de influencia térmica. Junto a la costura se encuentra la zona de fusión parcial, tras ella se disponen las zonas con distintos cambios estructurales.

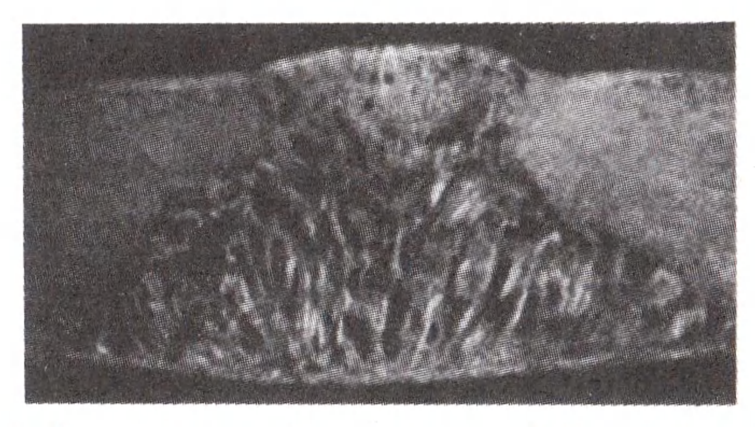
do la velocidad de cristalización es muy grande, la burbuja o parte de ella, puede quedar entre las ramificaciones de la dendrita y, en este caso, el defecto es inevitable.

El desprendimiento impetuoso de gases, antes de la cistalización, es resultado de las reacciones y éstas pertenecen a otro apartado de la ciencia de soldadura: la metalurgia de soldadura. La metalurgia enseña: en un metal poco desoxidado puede aparecer cierto gas, el monóxido carbónico. Con el fin de disminuir el desprendimiento de gases se introducen "al combate" desoxidantes (titanio, silicio, manganeso, etc.), que captan el oxígeno, creando óxidos en forma de escorias y no de gases.

Como ya se sabe, las escorias también deben eliminarse del metal de la costura. Pero a veces, sobre todo, al violar el régimen de soldadura, o en caso de soldar capas múltiples, algunas partículas de escoria, a pesar de todo, quedan en el metal solidificado. Al poseer diferentes dimensiones y forma, dichas partículas, de manera distinta reducen la resistencia mecánica del metal en la costura. Las más peligrosas son las acutángulas.

El proceso conformador de la costura no transcurre sin consecuencias también para el metal adyacente a la misma. Después de la soldadura, quedan deformaciones y tensiones variando, asimismo, las propiedades del metal.

La inmensa mayoría de los metales empleados en la técnica, construcción y en los servicos domésticos, son aleaciones del metal básico con aditivos útiles y nocivos. Entre los metales, un gran grupo está compuesto por materiales para la construcción que se utilizan en piezas de máquinas y obras. Semejantes materiales soportan grandes cargas y, por lo tanto, deberán poseer todo un conjunto de propiedades mecánicas, en primer lugar, ductilidad y resistencia. Los metales adquieren estas propiedades como resultado del mecanizado y del tratamiento térmico después de la colada, temple, laminado, estampado, etc. He aquí que de nuevo, durante la soldadura, se ven sometidos a la acción



La forma de la costura y la estructura del metal se ven en una muestra esmerilada y decapada de la unión soldada.

térmica. Debido a esto se "rompe" la estructura y cambian las propiedades de los metales.

Surgen esos cambios en diferentes sectores de la zona adyacente a la costura de distinta manera y dependen en mucho de los ciclos térmicos. El metal que se encuentra en la zona, cuyo calentamiento es superior a las temperaturas críticas, y cerca de ella, puede someterse al temple, descristalización, envejecimiento, etc.

Los cambios "imprevistos" de las propiedades del metal en algunas zonas del mismo son indeseables y pueden conducir a las más inesperadas consecuencias. Los soldadores deben saber cómo determinar qué transformaciones estructurales tendrán lugar junto a la costura y considerar los cambios en las propiedades del metal.

Grietas en frío en las uniones soldadas. Las tensiones de soldadura, las transformaciones estructurales, la redistribución de los elementos del metal en la costura y en la zona adyacente a ella pueden provocar un defecto muy peligroso para la unión soldada: la llamada grieta en frío. Estas grietas a diferencia de las calientes, que surgen en el proceso de cristalización, se forman a temperaturas nada elevadas, incluso después del enfriamiento, y a veces unos cuantos días después de la soldadura.

Si bien es verdad que las grietas iniciales, a simple vista imperceptibles, por lo general, aparecen en las primeras horas después de la soldadura y luego cuando el artículo soldado comienza a cargarse o se encuentra en condiciones desfavorables de temperatura, las grietas "explotan" produciendo un fuerte sonido y se propagan a toda la sección del empalme. Los artículos se destruyen.

Fueron necesarias investigaciones de varios años para aclarar tan sólo las regularidades fundamentales en torno a la formación de grietas en frío. Se propusieron y comprobaron unas cuantas hipótesis, algunas de ellas siguen elaborándose hasta el presente (hidrogénica, de temple).

¿Cómo averiguar si surgirán o no fisuras en frío al soldar una u otra estructura?

Los científicos ingeniaron métodos para evaluar la resistencia de las uniones soldadas frente a la aparición de grietas. Durante la soldadura de muestras se crean condiciones, artificialmente, que contribuyan a la formación de grietas. Por lo general, la muestra se fija en una base rígida, en una plancha de gran grosor. Después de la soldadura se comprueba si han aparecido grietas.

Datos más precisos se pueden obtener si las muestras (probetas) soldadas se someten a la tracción, torsión y flexión en aparatos especiales de pruebas. En este caso, la carga se puede asignar considerando las condiciones reales de funcionamiento de la estructura soldada.

La soldadura no deberá estropear el metal. Durante la soldadura, al metal se le depara poca suerte. Le acechan muchas peripecias y parece que es imposible evitar el surgimiento de poros, fisuras, deformaciones y tensiones. Sin embargo, miren a su alrededor por doquier nos contemplan estructuras metálicas. Pero allí donde haya metal, habrá soldadura. Transporte y edificios, puentes y torres, turbinas y depósitos... Todos hacen su servicio fiable para los hombres durante muchos años a condición de que hayan

sido correctamente diseñados y soldados con alta calidad. La necesidad de observar estrictamente estas dos condiciones la demostró el famoso científico constructor de puentes E. O. Patón, Académico de la Academia de Ciencias de la RSSU, fundador del Instituto de soldadura eléctrica, adjunto a la Academia.

Cuando a comienzos de los años 30 E. O. Patón empezó a ocuparse de la soldadura, las primeras investigaciones en este terreno las dedicó a la fiabilidad de las estructuras soldadas. E. O. Patón, una vez que determinó que no se pueden copiar ciegamente las unidades remachadas, aunque sean las más afortunadas, cimentó las bases estructurales de las obras racionales industriales y civiles soldadas y de los medios de transporte.

Automatización de la soldadura

La soldadura durante mucho tiempo se hacía a mano. Este procedimiento no permitía introducirla en la línea de producción en serie, acelerar el ensamble y el montaje de los artículos, garantizar una calidad impecable de la unión soldada. El colectivo del Instituto de soldadura eléctrica adjunto a la Academia de Ciencias de la RSSU, dirigido en aquel entonces por E. O. Patón, se propuso automatizar la soldadura. El Instituto planea la tarea de crear equipos que sean capaces de superar la soldadura manual, tanto en cuanto a la velocidad, como a la calidad de la costura soldada.

Entre todos los tipos conocidos entonces de soldadura, la mejor calidad se aseguraba mediante la soldadura con cortos electrodos revestidos que el soldador a medida que se fundían iba suministrándolos a mano a la zona de soldadura. Se decidió sustituir los electrodos cortos individuales por un alambre largo, recubierto con una capa protectora. Entonces sería fácil mecanizar el suministro del electrodo en forma de un rollo de alambre, mientras que el propio mecanismo

alimentador podría desplazarse a lo largo de la costura. Hay que tener en cuenta que la longitud de los electrodos individuales se limitaba (hasta medio metro) no sólo por comodidad para el soldador. El caso está en que el revestimiento no deja pasar la corriente y esta última se suministra al electrodo desde el extremo posterior que queda sin recubrir. La corriente, al circular a lo largo del electrodo, en correspondencia con la ley de Joule–Lenz, calienta la varilla metálica tanto más intensamente cuanto más larga sea. Pero el calentamiento hasta una temperatura alta es intolerable, puesto que en ese caso puede desprenderse el revestimiento. No se puede aumentar la sección transversal de la varilla (con el fin de disminuir la cantidad de calor desprendido), puesto que para que arda con estabilidad el arco y se funda uniformemente el electrodo es imprescindible una determinada densidad de la corriente en el extremo de este último. En una palabra, las leyes de la naturaleza exigían que la corriente hacia el alambre del electrodo se suministrara lo más cerca posible del arco. Cuanto más cerca, tanto mayor densidad de la corriente (o sea, la relación entre la intensidad de la corriente y el área de sección del electrodo) se puede admitir sin el recalentamiento del electrodo. Además, como se sabe, cuanto mayor sea la densidad, tanto mayor será la velocidad de fusión del electrodo, tanto mayor será el grosor que se puede soldar y tanto mayor la productividad de la soldadura.

Pero, ¿cómo suministrar la corriente a un electrodo de longitud ilimitada recubierto?

Simultáneamente, junto con los trabajos de investigación, tendientes a automatizar el proceso de soldadura, se desplegó una labor científica encaminada a examinar las características energéticas del arco y los procesos metalúrgicos en el baño de soldadura.

Se logró "organizar" el suministro de corriente. En el Instituto se elaboraron unos cuantos tipos de alambre que aun estando recubiertos con un revestimiento no electrocon-

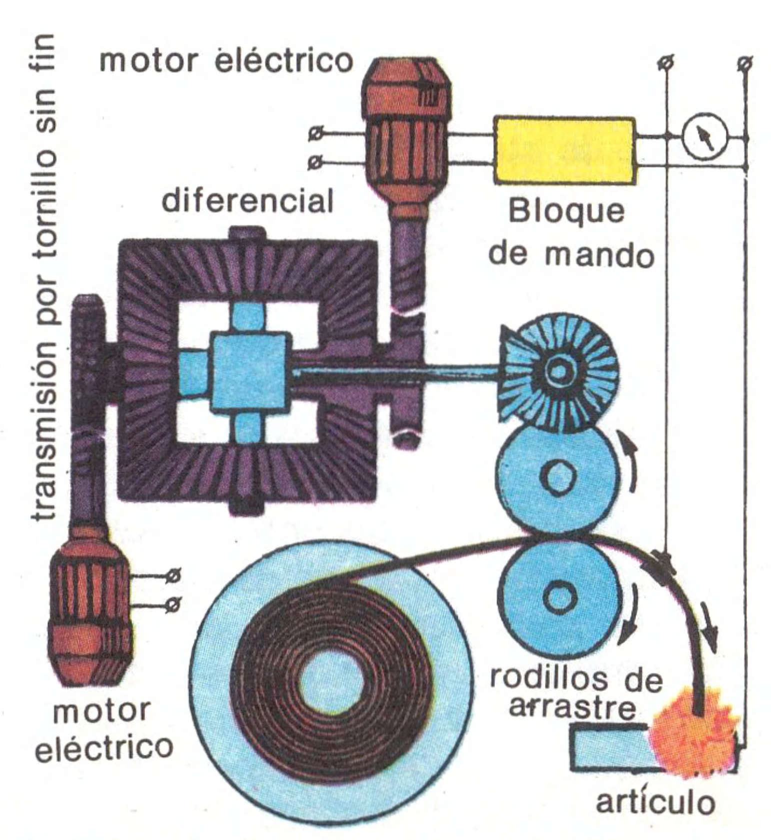
ductible, al mismo tiempo podían conectarse al circuito eléctrico de soldadura a través de su superficie. El mejor resultó ser el alambre con sección "cruciforme", en cuya superficie quedaban franjas no recubiertas. A través de éstas se suministraba la corriente desde una escobilla individual situada en la boquilla guía.

Cabezal soldador cuya velocidad de alimentación es dependiente. Ahora en lugar de un electrodo corto individual se podía emplear un rollo de alambre y trabajar un tiempo prolongado sin recarga del electrodo. Se construyó un mecanismo de avance especial a fin de suministrar el electrodo hacia la zona de soldadura. Ese mecanismo, junto con el sistema alimentador de corriente y el rollo de alambre, se instalaban en una carretilla que era precisamente la que desplazaba el cabezal soldador a lo largo de la línea de la costura.

Las partes mecánica y eléctrica del cabezal soldador tenían que mantener constante la longitud del arco. El electrodo se suministraba exactamente a la misma velocidad con que se fundía su extremo. Sin embargo, la velocidad de fusión del electrodo depende de multitud de factores. El principal de ellos es la intensidad de la corriente, con mayor exactitud, la densidad de la misma. También tienen gran importancia la composición del medio ambiente, la temperatura de fusión del electrodo y del baño. Estos y otros factores, el soldador experto con frecuencia los tiene en cuenta intuitivamente, procurando mantener la longitud del arco dentro de los límites permisibles.

Del soldador se exigen conocimientos y talento natural a fin de que sepa elegir y mantener la longitud precisa del arco; controlar la caída de las gotas que se desprenden del extremo del electrodo; obtener el ablandamiento necesario de los bordes del artículo, la longitud y profundidad del baño.

Bajo la dirección de E. O. Patón se creó un cabezal soldador que reproducía los movimientos de un soldador experto.



Esquema del cabezal soldador con velocidad dependiente de suministro del alambre para soldadura.

Este mecanismo no sólo regulaba la velocidad de suministro y la velocidad de fusión del electrodo, sino que reaccionaba al relieve de la superficie sometida a soldadura, al alargamiento o acortamiento repentino del arco. El cabezal consta de cuatro engranajes cónicos. Dos engranajes son de arrastre y se accionan independientemente por un motor cada uno (por intermedio de engranajes de tornillo sin fin), mientras que los otros dos engranajes son satélites, puestos libremente en los muñones de la cruceta del árbol principal. En el extremo del árbol se fija el rodillo de arrastre. Los rodillos de arrastre y libre suministran el alambre de electrodo.

De esta manera, la técnica de soldadura obtuvo un cabezal soldador automático con retroacción y un electrodo teóricamente de longitud infinita con posibilidad fiable para la conducción de corriente. No obstante...

Por el camino hacia la soldadura con fundente. En el año 1939, los soldadores de vanguardia ya casi habían logrado la misma velocidad de soldadura alcanzada por la soldadura automática con alambre de electrodos revestido.

E. O. Patón, al enterarse de los novísimos logros obtenidos por los soldadores de vanguardia, supo valorar con precisión la situación creada. Comprendía que por mucho que se mejorara el viejo método, aún cuando fuese el más acertado, los soldadores virtuosos que trabajan a mano siempre "empujarán". Por lo cual tan sólo modificaciones nuevas cualitativas, introducidas en el proceso de soldadura automática, podrían proporcionar los resultados deseados. En este caso era preciso prescindir del recubrimiento del electrodo que impedía aumentar la densidad de la corriente y, de esta manera, elevar la velocidad de fusión del electrodo.

Hoy día, cuando ya se conocen los resultados de la búsqueda, cuando en la base de los métodos más difundidos de soldadura yace la idea del electrodo desnudo, puede crearse la impresión de que esa idea era evidente. Sin embargo, el rechazo del revestimiento conducía a efectos negativos: en este caso empeoraba la calidad de la costura. Siendo mala la protección de la zona de soldadura, el aire penetra en el baño de la misma. Los óxidos y nitruros ferrosos que se forman, en este caso, van a parar al metal de la costura, volviéndolo frágil. Como resultado de ello empeoraba considerablemente la ductilidad, se reducía la resiliencia, formándose grietas.

Los inventores de la soldadura al arco N. N. Benardos y N. G. Slavianov, propusieron unos cuantos procedimientos para proteger el baño de soldadura. El más eficaz de ellos era el de Slavianov. Algunos sectores de la futura costura se moldeaban de antemano y después allí se echaba escoria fundida. En la práctica, este método servía sólo para reparaciones, o sea, para el recargue de algunas partes del artículo con metal. En cambio el aumento de la potencia en el arco seguía siendo un problema, ya que el extremo del electrodo y la parte del arco próxima a él no estaban protegi-

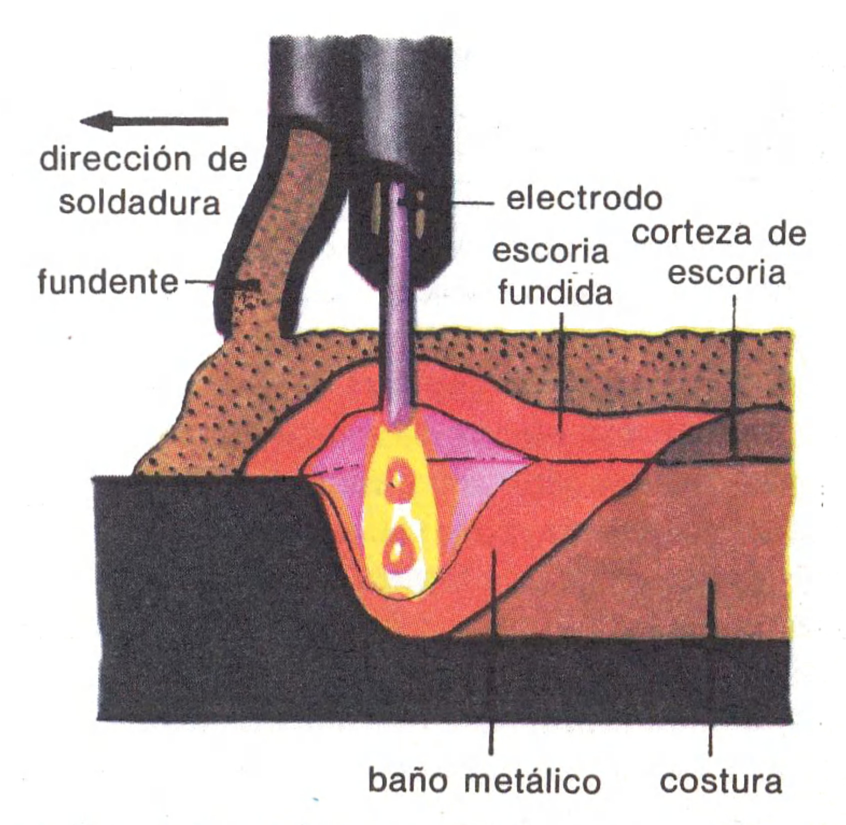
dos contra la incidencia del aire. El electrodo se fundía, el metal líquido chisporroteaba, además, tanto más fuerte cuanto más elevada era la densidad de la corriente.

De todas maneras, E. O. Patón llegó a la conclusión de que era necesario modernizar la soldadura, protegiendo el baño y, si se logra, también los electrodos recurriendo a áridos, es decir, al fundente, con la particularidad de que éste deberá ser activo de la misma manera que los revestimientos de los electrodos individuales.

En aquel entonces, la ciencia, conocida hoy como metalurgia de soldadura, todavía no existía. Si bien es verdad que en el Instituto de soldadura eléctrica ya unos cuantos años investigaban distintos componentes de revestimientos y compuestos del alambre para electrodos. No obstante, los fundentes, cuya composición era similar a la de los mejores revestimientos de los electrodos, no daban buena calidad del metal. Por lo visto, la soldadura bajo el lecho de fundente, transcurría en condiciones diferentes. ¿En cuáles? ¿Qué ocurre bajo una capa gruesa de granos cristalinos cuyo tamaño es casi igual al de un grano de arroz o de trigo?

La tarea de analizar la naturaleza de un proceso efímero a temperatura de miles de grados era de una extraordinaria complejidad. Ni siquiera se había logrado aún una misma opinión en torno a si arde o no el arco bajo el fundente. En EE. UU. los colaboradores de la firma Linde, que también elaboraban la soldadura con fundente, consideraban que el calor para fundir el electrodo y los bordes a soldar, se desprende al pasar la corriente a través del fundente fundido que se vuelve electroconductible.

E. O. Patón, teniendo en cuenta algunas observaciones, entre ellas la presencia de un profundo cráter – ahondamiento al final de la costura – que por lo general surge debido a la presión ejercida por el arco sobre el baño, se aferraba a la hipótesis “del arco”. Adelantándonos un tanto, diremos que en el año 1943 en el Instituto de soldadura eléctrica, se registraron oscilogramas del proceso y se demostró, mediante



Para la soldadura bajo el lecho de fundente se emplea alambre de electrodo sin revestimiento. El arco funde no sólo los bordes del artículo y el alambre, sino también cierta cantidad de fundente. El fundente fundido (escoria) protege la zona de soldadura. Después del enfriamiento, la corteza de escoria se separa con facilidad de la costura.

experimentos, la existencia del arco al soldar bajo el lecho de fundente. Los diseñadores obtuvieron premisas teóricas fiables. Posteriormente se logró ver el arco a través de un tubo de cuarzo.

En los años 1939–1940, una brigada del Instituto de soldadura eléctrica, junto con ingenieros fabriles, ya trabajaba sobre la soldadura automática del blindaje. Se gastaron enormes fuerzas y energía para resolver este problema sin que se pudiera obtener resultados positivos, en las costuras del blindaje surgían grietas. La calidad de las costuras, al aplicar la lenta soldadura manual al arco, resultaba mejor.

El fundente, en este último procedimiento, protege el metal fundido del electrodo y del baño contra la penetración

del aire; concentra el calor el la zona de soldadura; decelera el enfriamiento del baño, permitiendo la salida de los gases que fueron a parar allí; facilita la ionización del espacio del arco, asegurando la estabilidad del proceso; alea el metal de la costura con elementos adicionales; impide que se quemen los aditivos útiles.

Sin embargo, todas estas particularidades serán descubiertas más tarde, mientras que en aquel tiempo, a comienzos del año 1940, se elaboró la composición del primer fundente industrial para la soldadura con electrodos fundibles de acero. Al mismo tiempo, en el instituto culminó el diseño y la fabricación de un cabezal automático especial para soldadura, capaz de efectuar, además de las operaciones comunes, el suministro de fundente hacia la zona de soldadura y el retiro del mismo después de cumplir la soldadura. Se propusieron unas cuantas marcas de alambre de electrodos para diferentes tipos de aceros.

Desde finales del 1940, en la Unión Soviética comenzaron a aplicar con amplitud el método nacional de soldadura automática rápida. La supervisión de todos esos trabajos se encomendó a E. O. Patón.

Se requería diseñar para los artículos los planos de ejecución de las instalaciones automáticas para soldadura, fabricarlas, montarlas y regularlas; asegurar el suministro a las fábricas de fundentes y de alambre para electrodos y contribuir a que asimilasen la tecnología de soldadura.

Triunfo de la soldarura automática

A comienzos de 1941, la soldadura automática se había implantado ya en 20 grandes empresas de la URSS. Unicamente la soldadura de aceros para el blindaje "quedó estancada" en el laboratorio. El blindaje de tanques no quería someterse al nuevo método de soldadura.

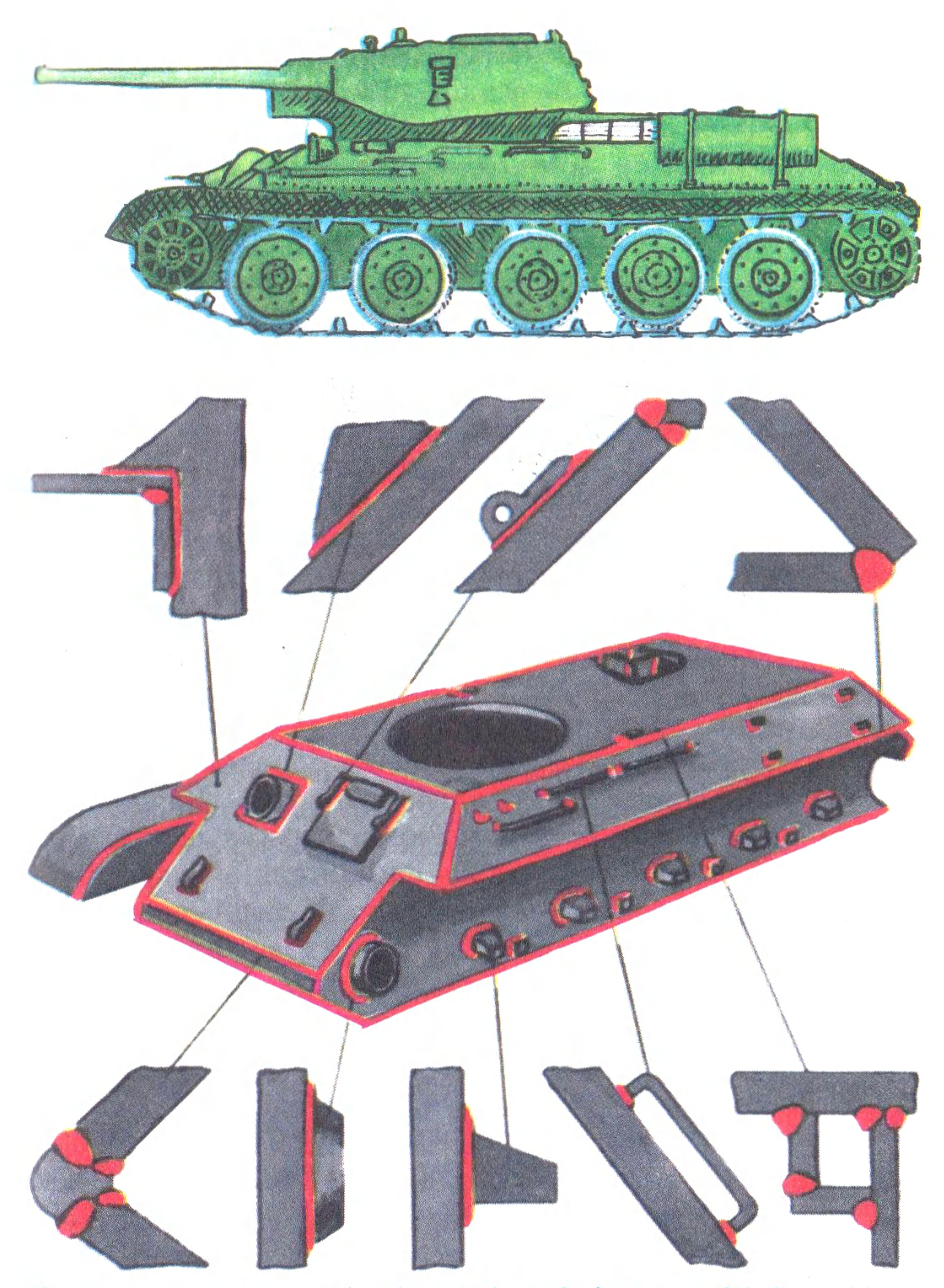
El arco suelda tanques. Los constructores de carros de combate (tanques) no tenían mucha confianza en la soldadura, procedimiento demasiado rápido para unir metales, y consideraban el remachado como un proceso tecnológico más fiable y lo suficiente productivo.

No obstante, en 1937 la caja del tanque T-26 se hizo no con remaches, sino por medio de soldadura manual al arco. En 1939, durante la guerra contra Finlandia, se descubrió que el blindaje del tanque T-28 remachado era débil. Entonces hacia los cuerpos (cajas) y torreras de los carros, ya dispuestos para enviarlos al frente, se soldaron chapas adicionales de blindaje con un grosor de 20–50 mm.

Pero la gran preocupación de los soldadores recaía sobre los nuevos tanques. El 19 de diciembre de 1939 soportó con éxito las pruebas y se recomendó para ser fabricado el tanque mediano T-34, que resultó ser el mejor de los tanques que participaron en la segunda guerra mundial.

El éxito en el empleo de una u otra estructura de tanque (como, por cierto, de cualquier otra maquinaria de amplio consumo), en grado considerable, depende de su adaptabilidad a la producción en gran escala y de la fiabilidad de la tecnología empleada para su fabricación. En la producción en masa son intolerables los frecuentes defectos en las piezas, el gasto excesivo de energía eléctrica y otros materiales, la elevada densidad de trabajo. Puesto que, incluso una pequeña insuficiencia, una falta o un descuido imperceptible a primera vista en una de las máquinas, al repetirse en toda la serie se transformará en pérdidas considerables, sobre todo sensibles en tiempos de guerra.

Las condiciones severas de la guerra exigían decenas de miles de tanques. La producción de cajas blindadas, que requerían soldadura, se convirtió en un obstáculo para aumentar la fabricación de tanques. Para cumplir ese trabajo hacían falta centenares, miles de soldadores con elevada cualificación, mientras que incluso en los tiempos de paz, ese tipo de especialistas escaseaba. Era absurdo querer preparar



El tanque es una compleja obra de ingeniería que se fabrica soldando uniones a tope y angulares en las más diversas posiciones espaciales.

la cantidad requerida de especialistas en tan breve plazo, sobre todo teniendo en cuenta que el frente necesitaba tantos o más hombres que la industria.

En esa situación sólo había una salida – la soldadura automática. En aquellos difíciles tiempos E. O. Patón comenzó a crear la tecnología para la soldadura automática del blindaje bajo el lecho de fundente con alambre de electrodos.

Los colaboradores del Instituto de soldadura eléctrica trabajaban 12–16 horas diarias. Turnándose uno a otro, soldaban trozos de acero para blindaje, cortaban muestras, las esmerilaban, las analizaban al microscopio, trituraban minerales, fundían materiales de aportación, de nuevo soldaban... Experimento tras experimento, fundente tras fundente, régimen tras régimen... Pero las fisuras, muy pequeñas, con frecuencia sólo perceptibles al microscopio, rajaban el monolito de la costura, presagiando contrariedades en caso de que el proyectil golpease al tanque. La tarea fundamental que estaba planteada ante la colectividad del Instituto consistía en averiguar la causa del agrietamiento de la costura y elaborar la tecnología para soldar el blindaje.

Los metalúrgicos soviéticos fueron capaces de crear un blindaje de calidad insuperable. No obstante, los mismos elementos químicos que aseguraban al metal una buena resistencia contra proyectiles y elevada supervivencia, lo hacían muy sensible al calentamiento y empeoraban su soldabalidad. Empero, los soldadores tenían que adoptar el blindaje por entero con todas sus propiedades, tanto buenas como malas. Su tarea consistía en que debían unir las planchas del blindaje de tal manera que los tanques, buques, cañones autopropulsados y otras estructuras soldadas tuvieran las cualidades de combate más elevadas.

Costura blanda. Las investigaciones en laboratorios por fin se coronaron con el éxito, fue detectada la causa principal que conllevaba a la aparición de grietas. Resultó que la gran

capacidad de fusión del arco, que arde bajo el fundente, necesaria para aumentar la productividad del proceso, tiene también aspectos negativos. Al baño de soldadura iba a parar una considerable cantidad de metal básico. Al mismo tiempo, pasaba al baño también el carbono. Al "unirse" con los aditivos de aleación, este último convertía el metal en un material propenso a la formación de grietas.

Para solucionar este problema se propuso una idea original, consistente en que en la holgura entre los bordes se colocaba, de antemano alambre podre en carbono, gastando parte del calor para fundirlo. Con esto, se lograba disminuir la fusión de los bordes, reduciendo el contenido de carbono en el baño.

Quedaba por contestar a los siguientes interrogantes. ¿Cómo se comportarán los tanques en el combate, cuando los proyectiles vayan a parar directamente a la costura con reducida cantidad de carbono? ¿Se podrá permitir el "funcionamiento" del tanque soldado con una costura más dúctil y menos dura que el blindaje?

E. O. Patón ya antes de las pruebas había dado respuesta a estas interrogantes: puesto que el diámetro del proyectil es mayor que la anchura de la costura, este último al ir a parar exactamente a la costura, de todas maneras chocará contra el blindaje y se agarrotará entre los bordes de la costura blanda. Una costura elástica sin defectos deberá recibir bien sobre sí las cargas de impacto durante la embestida. En el polígono de pruebas se corroboró que el científico tenía razón.

Al polígono se llevó un cuerpo de tanque un lado del cual estaba soldado por el viejo procedimiento a mano, mientras que el otro, por medio de un cabezal automático bajo el lecho de fundente. Las costuras "a mano" con el impacto de proyectiles perforantes y explosivos se destruían de inmediato. Las costuras "automáticas" continuaban soportando las chapas del blindaje, completamente deformadas, después de un cruentísimo tiroteo, inconcebible en condiciones reales.

Cadena para producir en serie tanques. La tecnología de soldadura automática para los cuerpos de los tanques se implantaba con rapidez en las fábricas de los Urales, Siberia, en la zona central del Volga. Los colaboradores científicos del Instituto de soldadura eléctrica se desplazaron de los laboratorios hacia los talleres, convirtiéndose en instructores-supervisores, contramaestres y tecnólogos. El grupo de diseñadores, en un breve plazo, creó instalaciones especiales para fabricar diferentes unidades destinadas a los carros de combate, entre ellas, instalaciones para soldar costuras circulares con las que se soldaban las torreras de mando, así como para soldar los anillos reflectores situados bajo la torreta. La soldadura rápida obligó a mejorar todo el proceso de producción de los cuerpos. En el taller se cambió el orden de los puestos de trabajo, con vagonetas se montó una cadena para el montaje y la soldadura de los cuerpos de tanques. Ahora, las piezas en bruto, en estricta secuencia se suministraban a los lugares de montaje y soldadura, donde con ellas se formaban las unidades y cuerpos de los carros de combate.

La productividad del nuevo método de soldadura superó las posibilidades de la soldadura con electrodos revestidos. Por ejemplo, para soldar el fondo de la aleta protectora hacia el costado, aplicando el método viejo, un soldador de alta cualificación tardaría cerca de 20 horas. Un novato, después de adiestrarse 5–10 días, soldaba estas costuras, a base del método nuevo, en 2 horas. El empleo de una instalación automática de soldadura liberaba 7 transformadores para soldadura y 8 bobinas de choque reguladoras, reportando una economía de energía eléctrica del 42%. Pero lo principal era la elevada calidad y la cantidad necesaria de tanques.

En aquel entonces, en torno al trabajo de E. O. Patón se inventó una leyenda. Los tanquistas que iban a la fábrica en busca de los tanques contaban a sus compañeros que por los talleres anda un alto profesor académico de bigotes canosos, venido especialmente desde Ucrania, golpea con un martillito

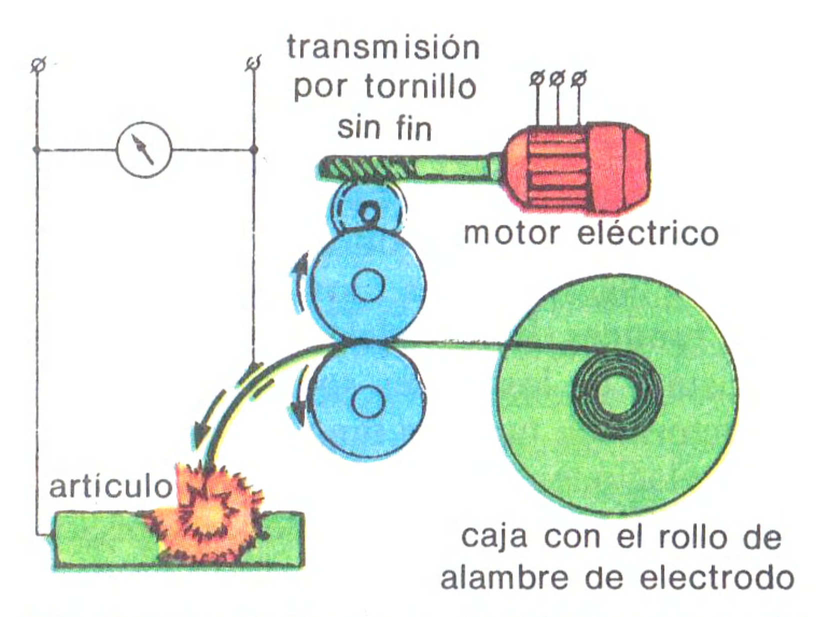
y "ausculta" cada tanque. Mas si él da el visto bueno, ya no hay por qué preocuparse del carro de combate, el proyectil no podrá transpasar su blindaje.

Hacia el verano de 1942, el Ejército Rojo disponía ya de 4065 tanques nuevos, pero ya durante la segunda mitad de ese mismo año, la industria soviética en cuanto a la producción de tanques, había adelantado a la industria de la Alemania fascista y de los países sojuzgados por ella. En las fábricas productoras de tanques funcionaban ya unas cuantas decenas de instalaciones automáticas para soldar. La Unión Soviética ganó la batalla industrial a los consorcios alemanes. En el verano del año 1943, el Ejército Rojo obtuvo la victoria en la batalla de tanques en las cercanías de Prójorovka, de la región de Kursk, una batalla sin precedente en la historia de la guerra. Los tanquistas soviéticos entraban audaces en combate contra todo tipo de tanques fascistas. En unos cuantos días se derrotó a siete divisiones de tanques de los nazis.

Entre tanto, los soldadores ya elaboraban la tecnología para unir planchas de blindaje con un grosor de 90 y 120 mm, destinadas a la producción de tanques pesados e instalaciones automotrices tipo "IS".

En el centro de la atención del dirigente del Instituto no sólo figuraba la tecnología de soldadura, sino también los equipos, puesto que como se sabe, la calidad de la soldadura en mucho depende de ellos.

Cabezal soldador de alta fiabilidad. El cabezal bimotor con retroacción para soldadura, que había sido costruido en los tiempos de paz y destinado a un tranquilo servicio, resultó ser poco seguro en tiempos de guerra. Los motores que suministraban el alambre de los electrodos, en dicho tiempo, funcionaban mal. Las oscilaciones de la tensión en la red influían sobre el número de revoluciones del motor de corriente continua y, por consiguiente, sobre la velocidad de suministro del alambre. Las alteraciones en el régimen de



Esquema del cabezal soldador con velocidad constante de suministro del alambre para soldadura.

soldadura, inevitablemente, conducían a una producción defectuosa.

En el presente, los soldadores utilizando los logros de la electrónica, crearon equipos con sistemas estabilizadores seguros, con sistemas que regulan los distintos parámetros del arco. Con ayuda de estos equipos se puede controlar el proceso de soldadura, programar los cambios de los parámetros, etc. En tiempos de guerra, incluso la estabilización de la tensión era un problema técnico casi irrealizable.

La segunda insuficiencia del cabezal de pre-guerra consistía en la complejidad de su parte mecánica, basada en la utilización de un diferencial especial. En tiempos pacíficos nadie hubiera prestado atención a esa complejidad, pero en condiciones de guerra, cuando las reservas de piezas reglamentarias se terminaron, la producción de cabezales soldadores quedó en peligro de suspenderse.

E. O. Patón se había dado cuenta, ya mucho antes, de las insuficiencias de los cabezales bimotores y tomaba todas las medidas a fin de simplificar su estructura y elevar la fiabilidad de su funcionamiento. No obstante, la mejor solución fue la

elaboración de un aparato en principio nuevo. El cabezal nuevo fue diseñado considerando la propiedad de autorregulación del arco, fenómeno descubierto en el Instituto de soldadura eléctrica en el año 1942.

La autorregulación del arco se manifiesta al soldar con electrodos que se funden, siendo suficientemente grandes las densidades de la corriente. En este caso, el régimen estable de soldadura se caracteriza por la igualdad de la velocidad de suministro del electrodo hacia la zona del arco y la velocidad de su fusión. La velocidad de suministro se asigna constante. En correspondencia con ella se fija la velocidad de fusión que es directamente proporcional al coeficiente de fusión del electrodo y a la corriente eléctrica de soldadura. Cuanto mayor sea la velocidad de suministro, tanto mayor será la corriente de soldadura y tanto mayor será la rapidez con que se funde el electrodo.

Todo esto transcurre a velocidad constante de suministro. Es decir, en los cabezales soldadores se puede instalar tan sólo un motor, es más !éste no depende de la tensión en el arco¡

Se comenzó a montar en el cabezal motores asincrónicos de corriente trifásica de pequeña potencia (cerca de 100 W) con un número constante de revoluciones.

Desapareció la necesidad de rectificadores de óxido de cobre que escaseaban, en lugar del diferencial se utilizaron engranajes comunes. Se simplificó el circuito eléctrico. A fin de cambiar la velocidad de suministro se introdujo un par de engranajes reemplazables. La sencillez de la fabricación y la fiabilidad de trabajo de los nuevos cabezales para soldadura eran indiscutibles. A partir de diciembre del año 1942, los talleres del Instituto de soldadura eléctrica pasaron por completo a fabricarlos.

Fundente a base de escorias de alto horno. En el apogeo de la implantación del nuevo método de soldadura a la dirección del Instituto de soldadura eléctrica comenzaron

a llegar informaciones alarmantes: "!Se terminan las reservas de fundente!".

La fábrica de vidrio, en la cual antes de la guerra se producía el fundente, había quedado en el territorio ocupado por el enemigo. En los Urales no se disponía de semejantes fábricas. Era preciso con urgencia contestar a los interrogantes: ¿Dónde adquirir fundente? ¿Se puede organizar su producción con las fuerzas de que disponemos?

Ante los grupos tecnológicos del instituto que comenzaron la búsqueda de un fundente sustituto, surgió una compleja tarea: producir el fundente con materia prima local. A base de la experiencia acumulada, al elaborar la soldadura bajo el lecho de fundente, se logró calcular la cantidad necesaria de componentes por separado. Se descubrieron minerales locales que contenían los elementos necesarios.

Se inició la comprobación experimental. Los distintos minerales se trituraban, tamizaban, se pesaban minuciosamente, se mezclaban y se cargaban en un horno eléctrico. Al cabo de 2–3 h de cocción, a temperatura próxima a 1600 °C, la masa fundida se granulaba, (se vertía) en agua, se secaba, trituraba y tamizaba. Las pruebas del fundente se efectuaban directamente en la soldadura. Se planteaban requisitos muy elevados.

Durante la soldadura, el arco tiene que arder con estabilidad, las oscilaciones de la corriente y la tensión deberán ser insignificantes, la llama no deberá penetrar a través del fundente, la costura tendrá que ser lisa, la superficie brillante con pequeñas escamas, la escoria se separará fácilmente mediante ligero martilleo, no se admitirá ninguna clase de fisuras y defectos...

Unos compuestos se desechaban de inmediato, con otros se seguía trabajando, corrigiendo con exactitud hasta de 1–2% el contenido de componentes. El último criterio, en cuanto a la aptitud del fundente, correspondía a las pruebas mecánicas de las uniones soldadas y del metal de la costura. Durante estos ensayos se determinaban: la resistencia a la



E. O. Patón con el modelo del tanque T-34.

rotura, el límite de fluencia, el alargamiento relativo, la resiliencia, la contracción relativa, la resistencia a la fatiga.

El nuevo fundente recibió el nombre de AN-2. Se logró componerlo tan sólo de cuatro minerales: arena, caliza, mineral manganífero y de una pequeña cantidad de espato flúor. Al fundirlos obteniendo una masa cristalina tenían lugar ciertas transformaciones químicas: el fundente se desoxidaba, librándose del protóxido de hierro y de los óxidos superiores de manganeso (que se encontraban en el mineral manganífero, en la arena), se desgasificaba.

Restaba únicamente organizar su producción industrial. Las necesidades de la industria en fundente se incrementaron tanto que para su producción era necesario construir una fábrica similar a la fábrica de vidrio. Además, para abastecerla con materia prima se precisaba abrir nuevas

canteras. Estas exigencias eran irreales en condiciones de guerra.

E. O. Patón propuso utilizar en calidad de fundente la escoria de alto horno, pero ésta se destacaba por un elevado contenido de azufre, lo que para el fundente es intolerable. Por esta causa se comenzó a analizar las escorias de los altos hornos viejos que funcionaban a base de carbón de leña, en el cual no había azufre. La escoria de los altos hornos en Ashinsk, cerca de Ufá, resultó ser parecida al fundente AN-2. En ella faltaba el 10% de óxido manganoso.

Los metalúrgicos añadieron mineral manganífero a la carga de alto horno y para el verano del año 1942 la elaboración del fundente "a base de escoria", que recibió el índice ASh, había culminado. El nuevo fundente ofrecía la posibilidad de soldar tanto el blindaje, como aceros para construcciones. E. O. Patón, por sus relevantes méritos en la elaboración de la soldadura rápida para el blindaje y la aceleración de la producción de la técnica de combate, en marzo del año 1943, recibió el honroso título de Héroe del Trabajo Socialista. En breve plazo, bajo condiciones complejas de los tiempos de guerra, la colectividad del Instituto de soldadura eléctrica, diseñó el equipo y elaboró la tecnología de la soldadura automática al arco para cuerpos blindados, otros tipos de armamento y municiones. En los EE. UU. sólo en el año 1944 se asimiló la soldadura del blindaje bajo el lecho de fundente, mientras que el primer cabezal de soldadura con velocidad constante en el suministro del alambre de electrodo se logró únicamente en el año 1953. En Alemania los tanques siguieron soldándose a mano hasta finales de la guerra.

Los trabajos prácticos intensivos encaminados a crear la soldadura al arco bajo el lecho de fundente se impulsaban paralelamente con los trabajos de investigación científica. En aquel período obtuvieron un desarrollo particular los fundamentos metalúrgicos de la soldadura y los fundamentos científicos para el diseño de equipos soldadores.

Soldadura en obras y talleres

Nuevas condiciones, nuevos equipos. Aún no había terminado la Gran Guerra Patria, cuando ya el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", retornaba a la recién liberada ciudad de Kíev, donde sin interrumpir los trabajos con destino defensivo, se ocupó en problemas de la economía nacional. Miles de empresas, altos hornos, minas, puentes, destruidos esperaban la soldadura.

Los equipos, la tecnología, los fundentes, elaborados por el instituto para los tanques, ahora hacía falta utilizarlos en la producción pacífica. Sin embargo, los cabezales voluminosos suspendidos estaban calculados para trabajar en condiciones estacionarias, en talleres donde se fijaban firmemente en montantes o se desplazaban por carriles. Semejantes instalaciones no se podían utilizar en la construcción y en trabajos de montaje para ejecutar costuras de configuración compleja, como por ejemplo, el costillaje y el forro del casco de un barco, o unir piezas en diferentes posiciones espaciales, tales como juntas de tuberías y muchas otras cosas.

La colectividad del instituto comenzó a diseñar aparatos trasladables, automotrices para soldar: el llamado tractor soldador, a saber, la máquina automática que se desliza en guías colocadas sobre la pieza; así como los equipos semiautomáticos para soldadura que representan en sí cabezales portátiles, deslizables a mano. Pronto la URSS obtuvo toda una serie de tractores universales para soldadura tipo "TS". Estos aparatos ejecutan todas las funciones fundamentales de una instalación para soldar y, al mismo tiempo, pueden incluso trasladarse directamente sobre el artículo sometido a soldadura y realizar costuras rectas y circulares, en las uniones a tope, angulares y solapadas.

Así se creó la soldadura al arco semiautomática bajo el lecho de fundente. Además, se logró conservar todas las ventajas tecnológicas que poseía el método de soldadura



automática. En el equipo semiautomático el alambre de electrodo se desenrolla del carrete y se empuja por el mecanismo suministrador a una manguera especial y desde ésta hacia el soplete fijado en el sujetador. Este se encuentra en la mano del soldador. Por consiguiente, se mecanizó únicamente el suministro del alambre, en cambio el obrero obtuvo la posibilidad de manipular el arco. El fundente hacia la zona de soldadura cae desde un pequeño embudo-tolva fijado al sujetador. Los equipos semiautomáticos, sobre todo ampliamente empezaron a aplicarse para soldar costuras cortas y discontinuas.

A principios de los años 50, la soldadura semiautomática desplazó, de manera considerable, la soldadura manual allí donde era imposible utilizar equipos automáticos, o sea, al fabricar unidades espaciales complejas, módulos de barcos, vagones, locomotoras, tractores, altos hornos y entramados de edificios.

Los principios estructurales de los equipos automáticos y semiautomáticos para soldadura bajo el lecho de fundente, después sirvieron como base al crear aparatos para la soldadura al arco en gases protectores.

Centenares de diferentes marcas de equipos automáticos y semiautomáticos, accesorios y equipos auxiliares fueron diseñados por los proyectistas-soldadores del Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", el Instituto nacional de investigación científica de equipos para soldadura eléctrica de Leningrado, así como por diseñadores de muchos otros institutos de investigación científica, de cátedras en instituciones de enseñanza superior, oficinas de empresas inductriales de la URSS.

Puentes del futuro. Una etapa particular en el desarrollo de la teoría y de la técnica de soldadura eléctrica al arco, la jalonó la construcción del famoso puente tendido a través del río Dniepr en Kíev.

El puente, una obra ingenieril compleja, deberá soportar

grandes cargas estáticas y dinámicas, por eso en cuanto a su resistencia mecánica se exigen requisitos especiales.

En el Instituto de soldadura eléctrica se creó un acero especial, pobre en carbono, de elevada calidad. Simultáneamente se elaboraron las correspondientes composiciones del fundente y del alambre, la metodología para comprobar la calidad de las uniones soldadas, los regímenes y procedimientos de soldadura para unir metales de gran grosor por medio de equipos automáticos y semiautomáticos. Quedaba por solucionar la tarea relacionada con la estructura de los futuros puentes soldados y de cómo organizar su fabricación. Los científicos del instituto propusieron crear puentes soldados por entero.

Sin embargo, resultó que muchos científicos-constructores de puentes y soldadores, consideraban que los puentes soldados por entero era cosa del futuro e insistieron en el remachado de las juntas de montaje. La práctica resolvió el litigio. A través del río Snezhet, se tendió un puente experimental soldado por entero con una luz de puente de 77 m, que soportó todos los ensayos de prueba.

E. O. Patón, científico constructor de puentes y científico soldador, creó la forma racional y la tecnología óptima para fabricar puentes soldados por entero. Propuso prescindir de las armaduras de celosía que es imposible soldarlas por medio de equipos automáticos y sustituirlas por vigas grandes soldadas de acero en chapas. Se decidió que estas vigas se produjeran en la fábrica por medio de soldadura automática, mientras que directamente en la plazoleta de construcción se ejecutasen sólo las juntas de montaje entre grandes unidades. De hecho se comenzó a construir puentes en las fábricas.

La fábrica de estructuras metálicas de Dnepropetrovsk asimiló con éxito la construcción de puentes. Precisamente a esta fábrica se confió la soldadura de 264 vigas (cada una de ellas con una altura de 3,6 m, longitud de 29 m y peso de 28 t), de las cuales en Kíev se montó un puente, soldado por

entero, con una longitud de 1542 m. Este pesa cerca de 10 mil t. Casi todas las costuras del puente fueron soldadas con equipos automáticos y semiautomáticos. Si las estructuras hubieran sido remachadas, habría sido necesario taladrar millones de agujeros y para los roblones y cubrejuntas se hubiese gastado complementariamente centenares de toneladas de metal.

Desde entonces transcurrieron cerca de tres decenios. Las soluciones halladas durante la construcción del puente, que lleva el nombre de E. O. Patón, enriquecieron la experiencia en el montaje de puentes, tanto nacional como extranjera. Nuevos puentes, soldados por entero, cruzaron los ríos en diferentes continentes.

Depósitos de petróleo enrollables. Millones de toneladas de petróleo, que se extraen anualmente de las entrañas de la tierra, se almacenan en depósitos de petróleo. Enormes cilindros de acero con un diámetro de varias decenas de metros y una altura de dos-tres decenas de metros, contienen en sí unos cuantos miles de toneladas de petróleo, cada uno. Para soportar la presión del líquido, sin encorvarse ni romperse, el grosor calculado del fondo y la pared de un depósito mediano con un volumen de 5000 m^3 alcanza 8 mm.

Ya antes de la guerra, la soldadura se había arraigado de lleno en la construcción de depósitos. Estos se fabricaban con hojas separadas de anchura un poco más de un metro y longitud dentro de los límites de 10–20 m. Estas dimensiones están limitadas a las posibilidades de los trenes de laminación y de los medios de transporte. Los depósitos con semejantes "trocitos" se montaban como una casa de ladrillos, es decir, una hoja se ponía junto a la otra y se soldaban, después la siguiente, luego la siguiente y así hasta formar el fondo. Por los bordes del fondo se instalaban y soldaban las hojas de las paredes con la curvatura necesaria. Se montaban hoja tras hoja hasta cerrar el cinturón. Luego sobre el cinturón inferior se montaba el siguiente

y así sucesivamente cada vez más alto. Después le llegaba el turno al techo y, de nuevo, se montaban hoja tras hoja, cinturón tras cinturón.

Ese trabajo resultaba muy laborioso y complejo. La mayoría de las costuras se disponía en la pared vertical. Sólo podían ejecutarlas soldadores de alta cualificación. Ingenieros, técnicos y colaboradores científicos de todo el mundo probaban con insistencia perfeccionar la compleja tecnología para fabricar esta estructura soldada, lo bastante sencilla. El problema sobre la construcción de depósitos de petróleo se planteó con especial agudeza en la URSS puesto que en los territorios, temporalmente ocupados por los fascistas, se habían destruido todos los almacenes de petróleo.

¿Cómo cumplir el enorme volumen de trabajos de soldadura para reponer las bases de aprovisionamiento de petróleo? ¿Dónde conseguir miles de soldadores cualificados?

Los científicos del Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" propusieron un nuevo principio para el montaje de depósitos: efectuar casi toda la soldadura en la fábrica en posición inferior, por ser la más cómoda, con equipos automáticos de elevada productividad y bajo el lecho de fundente.

¿Cómo hacer en un taller un cilindro de acero cuya altura supera en unas cuantas veces la altura del recinto? ¿Y cómo transportar ese cilindro a la base de aprovisionamiento de petróleo?

Las respuestas a estos interrogantes eran tan sencillas como la propia idea. Las tres partes fundamentales del depósito, en forma de chapas, –el fondo, la pared y el techo– fabricarlas por completo en forma de hojas planas, correspondientes a su desarrollo, después envolverlas en rollos cilíndricos, cómodos para transportarlos por ferrocarril. *In situ*, en la base de aprovisionamiento de petróleo, restará sólo soldar una costura vertical de las paredes, una costura en el techo cónico y dos costuras que unen entre sí el fondo, la pared y el techo, así como un

pequeño volumen de soldadura para montar la columna interna, los entramados y las escaleras.

A comienzos del año 1948, por primera vez en la práctica mundial, se inició la producción de depósitos aplicando la nueva tecnología. Los rollos cilíndricos llevados a las plataformas de montaje, se desarrollaban con facilidad por medio de un tractor, sin dañar las costuras. En un año en los trabajos de montaje se economizó casi un millón de rublos, mejorando mucho la calidad de los depósitos.

Caldera con paredes gruesas de chapas finas. En una multitud de ocasiones, la soldadura abría el camino para crear nuevos equipos, daba el "visto bueno" a nuevos procesos tecnológicos, aparatos y dispositivos.

Resultaría muy difícil enumerar todos los complejos problemas tecnológicos, constructivos y de organización que tuvieron y tienen que resolver los soldadores. Muchas de sus soluciones, cambiaban de manera radical, la producción, abaratando la fabricación, simplificando la estructura, mejorando las cualidades de servicio de los artículos.

Con ayuda de la soldadura se resolvieron muchos problemas técnicos, uno de los más recientes fue el problema de crear aparatos de alta presión. La elevación de la presión y la temperatura del medio operacional en la energética y en la tecnología química, proporciona un efecto notorio. Pero cuanto más se elevaban esos parámetros, tanto más había que aumentar el grosor de las paredes de los recipientes y tubos (20, 30, 40, 50 mm), tanto más difícil resultaba su fabricación: colar, forjar, tornear, soldar.

Así que los soldadores se veían obligados a poner "en combate" medios cada vez más potentes: la soldadura multilaminar al arco, eléctrica bajo el lecho de escoria, por bombardeo electrónico. Las posibilidades tecnológicas de la soldadura no estaban aún agotadas, cuando de repente resultó que ya no tenía sentido seguir aumentando el grosor de las paredes. La resistencia mecánica del metal de las

paredes gruesas disminuía en comparación con la resistencia de un metal con una composición química idéntica, pero en chapas finas.

Como se sabe, los artículos de un mismo acero con una misma composición de elementos, pero fabricados por distintos procedimientos, poseen diferentes propiedades mecánicas. El metal de una barra gruesa colada o incluso forjada, después de laminarlo, obteniendo una tira de pequeño grosor, se vuelve mucho más resistente, puesto que los cristales grandes se afinan y los defectos "se exprimen".

Sin embargo ¿cómo utilizar esa verdad tan vieja y conocida? ¿Qué relación existe entre las hojas finas y los tubos y recipientes gruesos?

El nuevo principio para fabricar recipientes y tubos aseguró, bajo cualquier grosor de las paredes, una resistencia mecánica del metal igual a la que poseen las chapas finas laminadas. Este procedimiento consiste en que las hojas de acero, relativamente finas, se envuelven en el tambor básico en forma de un rollo compacto que conforma la virola cilíndrica del recipiente o tubo. Los extremos de la cinta y los topes de la virola se sueldan, por lo cual las capas no pueden deslizarse una sobre otra y el recipiente multilaminar no se desenrollará. La longitud de la virola es igual a la anchura del acero en rollos (1–2 m) y para fabricar un recipiente largo, las virolas se sueldan entre sí con costuras anulares compactas de alta resistencia mecánica. Los recipientes multilaminares de alta presión y los tubos para cañerías troncales de gas son extraordinariamente seguros. La creación de semejantes estructuras supuso una verdadera revolución en distintas ramas de la técnica.

Estructuras soldadas en los ámbitos de la ciencia. Los soldadores han propuesto multitud de audaces y originales ideas que mejoraron la tecnología de fabricación y que modificaron el aspecto de las máquinas, aparatos, obras industriales. Con frecuencia a los autores de nuevos

proyectos se les suele hacer las siguientes preguntas: "¿Cómo ustedes se arriesgaron a enrollar, aplastar, estampar...? ¿Qué pasaría en caso de que en depósito (tubo, radiador) estallara durante las pruebas?".

Todo aquel que propone y desarrolla nuevas ideas, ya sea el colaborador científico o bien el obrero innovador, siempre se arriesga a chocar con resultados imprevistos e incluso desagradables. Los conocimientos coadyuvan a disminuir el grado del riesgo. Para todo proyecto y proceso tecnológico es de gran importancia la definición de "fundamentado". Por lo que se refiere a estructuras soldadas de máquinas y diferentes obras, en esta definición se introduce, en primer lugar, el cálculo de la resistencia mecánica.

Los soldadores prestan gran atención a elaborar elementos y unidades de estructuras soldadas más perfectos, al cálculo de la resistencia mecánica de las uniones soldadas, a la tecnología óptima de fabricación y al estudio del funcionamiento de los empalmes soldados. Las investigaciones científicas en esta dirección se llevan a cabo en el Instituto de soldadura "E. O. Patón", en la Escuela Técnica Superior "Bauman", de Moscú, bajo la dirección de G. A. Nikolaev, en el Instituto Politécnico de Leningrado, en el Instituto de Investigación Científica sobre Tecnología en la Construcción Naval y otros. Para que las máquinas y las obras correspondan a su destino y puedan normalmente hacer su servicio, sus elementos (revestimiento, armazones, nervios, entramados, etc.), deberán poseer tal margen (factor) de seguridad, que no se destruyan bajo la acción de las cargas operantes y de su propio peso. Claro está que cuanto más macizos sean los elementos de las estructuras y más gruesas sus secciones, tanto mayor será la magnitud de las cargas externas que pueden soportar.

No obstante, éste no es el factor único a tener en cuenta al determinar las dimensiones de las estructuras y costuras. El metal sobrante aumenta el coste de fabricación y, con frecuencia, la explotación, por ejemplo, en los medios de

transporte. El incremento de las dimensiones del artículo conduce al aumento de su propio peso.

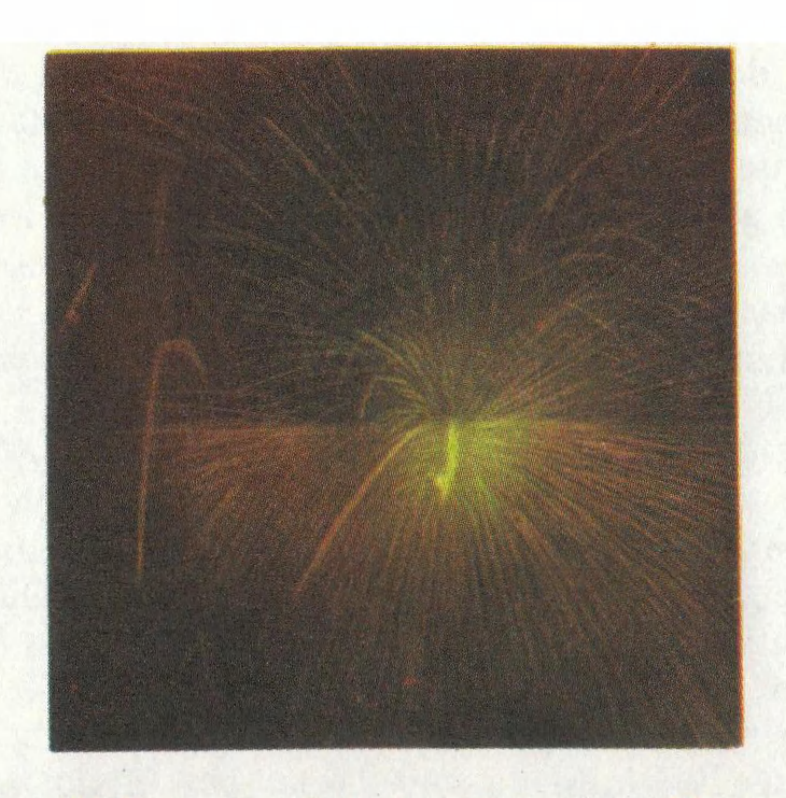
La salida de esa situación consiste en calcular las secciones de los elementos de las estructuras y de las costuras soldadas, partiendo de la condición de que las tensiones que surgen en ellos sean en una cierta magnitud menores que las tensiones bajo las cuales se destruye el material elegido para fabricar la estructura concreta.

Las posibilidades físicas de cada material para construcción se caracterizan por el límite de rotura, límite de fluencia, resiliencia, contracción relativa y por otros índices. Estos índices se determinan recurriendo a métodos especiales. Por ejemplo, para determinar el límite de rotura de una unión soldada, de ésta se corta una franja con una anchura de varios milímetros hasta decenas de milímetros, en dependencia del grosor del metal. En el centro de esa franja se encuentra la costura. La probeta se fija en la máquina de pruebas y se comienza a alargarla, registrando los esfuerzos aplicados. Si el esfuerzo con el cual se rompió la probeta se divide entre el área de su sección (obtenida multiplicando la anchura por el grosor), esto será precisamente el índice del límite de rotura a la tracción.

En caso de que los elementos de la estructura o de la costura se sometan no a la tracción, sino a la cizalladura o compresión, entonces se tomará en cuenta la capacidad del material de oponer resistencia al corte y a la compresión.

Las costuras soldadas de los elementos de las estructuras que se someten a flexión, en dependencia de su posición, soportan esfuerzos de tracción, de compresión o de corte. Estos esfuerzos se calculan valiéndose de fórmulas determinadas.

Aquellas estructuras sobre las cuales con periodicidad actúan cargas múltiples veces repetidas, se calculan además considerando la resistencia a la fatiga. En este caso, la magnitud de las tensiones admisibles se reduce, puesto que la resistencia mecánica de los metales, bajo cargas periódicas (se



Proceso de soldadura por contacto a tope con chispas.

define por el límite de fatiga), decrece y depende del carácter de la carga, de la concentración de tensiones y de otros factores.

El método de soldadura más productivo. Para unir piezas aplicando la soldadura por contacto a puntos son suficientes décimas de segundo. Además, simultáneamente en el artículo se pueden poner decenas de "remaches eléctricos". He aquí por qué este método de alta productividad se trata de emplear en la producción en masa. Por ejemplo, las piezas para la carrocería del automóvil "Moskvich-412" se fijan por medio de cinco mil puntos. Otra soldadura que se distingue por su elevada productividad y alto grado de automatización es la soldadura a tope por contacto. Sin embargo, este procedimiento se utiliza sólo para unir piezas de pequeñas secciones. Para soldar artículos voluminosos hacían falta instalaciones enormes de soldadura con potentes fuentes de corriente eléctrica que pudiesen desarrollar considerables

esfuerzos de compresión.

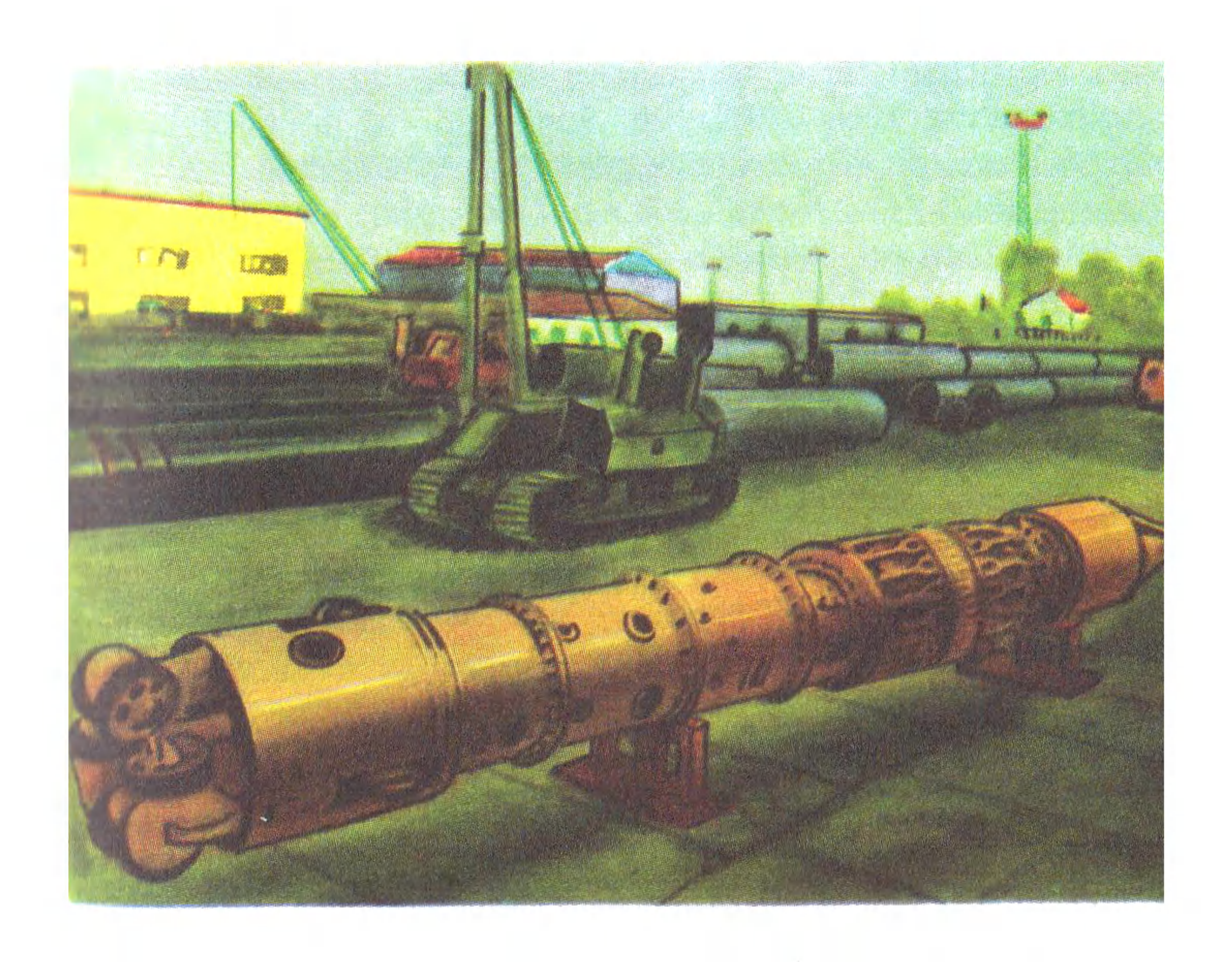
Los científicos propusieron una salida de esta situación, a saber, un calentamiento adicional más eficaz. Así, en la soldadura a tope por chisporroteo, para calentar los topes de las piezas se logró emplear además otros fenómenos de transformación de la energía eléctrica en calor. El Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" elaboró la tecnología de soldadura recurriendo al método de chisporroteo continuo para unir artículos de grandes secciones, lo que permitió reducir de manera notoria la potencia de las máquinas soldadoras y de las fuentes de alimentación, así como aumentar la productividad del trabajo, siendo elevada la calidad de la unión soldada.

Este procedimiento resultó de particular efectividad al soldar rieles, tuberías, cárteres de los motores diesel.

La potencia de los motores diesel que fabrica la empresa de locomotoras en Kolomna, constituye miles de caballos de vapor. El cárter, es decir, la cubierta rígida del motor, donde se ubican los cilindros, las válvulas y otros elementos, es un artículo con gran volumen de trabajo en su producción. Esta estructura voluminosa de acero con multitud de planos que se cruzan entre sí se soldaba a mano con electrodos sueltos.

En la fabricación de un solo cárter se tardaba un mes, los soldadores manipulaban el electrodo con dificultad en los estrechos compartimientos. Además, muchos de éstos se encontraban en el plano vertical. El proceso se hubiese facilitado poco aún creando un aparato automático especial para la soldadura al arco, puesto que se requería demasiado tiempo para la previa preparación y montaje de las piezas. Habría que dar la vuelta e inclinar multitud de veces la pesada estructura de varias toneladas. Además, para atender cada aparato automático haría falta un soldador..

Parecía que la soldadura, en este caso concreto, ya había agotado todas sus posibilidades y por ningún medio podía cumplirse la tarea, cuya condición fundamental consistía en: reducir el tiempo para fabricar el artículo, disminuir la



En el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", para hacer costuras anulares unidas con soldadura por contacto, se ha creado una instalación especial (K-700), que se desplaza autónomamente dentro de la tubería. Varias instalaciones de este tipo fueron adquiridas por los EE. UU.

cantidad de obreros y lograr una calidad estable de la costura, independientemente de la cualificación del soldador.

Esta tarea fue resuelta por los colaboradores del laboratorio de la soldadura a tope por presión del Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón". Cuando se puso en servicio la instalación, sus posibilidades resultaron asombrosas: la productividad del trabajo gastado para fabricar el cárter aumentó 79 veces, su precio de producción se redujo 18 veces. En lugar de 300 personas (soldadores, ajustadores de montaje, inspectores de calidad) el programa

para fabricar el cárter lo ejecutan el dirigente de los trabajos y dos operadores.

Muchas firmas extranjeras se interesaron por la instalación. Por cierto, los trabajos de los soldadores soviéticos en el terreno de soldadura por contacto se apreciaban mucho con anterioridad. Por ejemplo, las máquinas para soldar carriles, creadas en el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" funcionan en EE. UU., el Japón, Francia, Italia, Bélgica, Polonia, la República Democrática Alemana, Checoslovaquia y Hungría.

Dominio de los metales y sus aleaciones

Desde comienzos del siglo XVIII, como resultado del impetuoso desarrollo de la química, metalurgia y después la electrotecnia, la humanidad obtuvo muchos miles de aleaciones de metales con las más diversas propiedades.

En el presente este arsenal de materiales sigue aumentándose con intensidad. Estos materiales son capaces de "trabajar" en las condiciones más críticas, bajo la acción de presiones extraaltas y ultrabajas; de conservar la resistencia mecánica a temperaturas tales, bajo las cuales los materiales ordinarios se funden; soportan los efectos de los medios agresivos; poseen propiedades especiales, eléctricas, magnéticas y otras.

Estos materiales especiales son imprescindibles en la energética, radioelectrónica, misilística, aviación y química modernas y en otras ramas de la nueva técnica.

Para crear uniones de nuevos materiales, con frecuencia, los procedimientos existentes de soldadura son inaplicables. Entonces ante los científicos-soldadores surge la tarea de crear un nuevo proceso tecnológico.

Con el fin de resolver esta tarea se requiere: 1) elegir el método de suministro de energía hacia la zona de soldadura;

2) encontrar la fuente de energía y el método de su trnasformación en los tipos necesarios para la soldadura; 3) buscar las vías para proteger la zona de soldadura, que garanticen alta calidad del metal de la costura; 4) diseñar los equipos básicos y auxiliares; 5) elaborar los materiales de soldadura.

Antes de examinar cómo se resolvieron las tareas de soldadura de metales no férreos, veamos cómo se perfecciona la soldadura del metal férreo, el acero, puesto que la lista de nuevos materiales, en lo fundamental, aumenta por cuenta de las aleaciones de hierro, la principal de las cuales es el acero.

No es tarea fácil crear la protección del baño de soldadura. Muchas ramas de la industria y la construcción exigían materiales con propiedades especiales. Con el fin de asegurar la termoestabilidad y la resistencia a altas temperaturas, permeabilidad magnética y viscosidad y resistencia eléctrica, requeridas, los metalúrgicos introducían en el acero: níquel y cromo, molibdeno y vanadio, tungsteno y titanio, niobio y zirconio, etc. En los años 50, la soldadura automática y semiautomática de aceros bajo el lecho de fundente, en cuanto a la productividad del trabajo y calidad de la unión soldada, aventajó a sus competentes, o sea, a la soldadura manual al arco con electrodos sueltos y a la soldadura por llama de gas.

Al mismo tiempo, los fundentes y los revestimientos de los electrodos, destinados para soldar unos tipos de aceros, no aseguraban la composición correspondiente y las propiedades del metal de la costura al soldar otros aceros.

Las causas se debían a reacciones químicas “no previstas” entre los elementos que integran la composición del fundente, el metal de los bordes y el metal del electrodo.

Si bien es verdad que la ciencia de soldadura ya podía predecir estos cambios. Su sección, denominada metalurgia de soldadura, estudiaba las particularidades de los procesos

metalúrgicos en la zona de soldadura. El fundente líquido (escoria) y el metal fundido interaccionan tan sólo unos cuantos segundos en el pequeño volumen del baño a altas e irregulares temperaturas, siendo rápidos el calentamiento y enfriamiento. Durante ese lapso, unos elementos tienen tiempo para pasar de la escoria al metal, otros por el contrario, se desalojan del metal, la cantidad de los terceros se iguala o se redistribuye. Además, en el centro del baño, en la zona de elevadas temperaturas, las reacciones pueden transcurrir en una dirección, mientras que en la cola –en dirección contraria.

Conociendo estas y otras muchas particularidades se podía calcular las composiciones de los fundentes para soldar cada metal concreto y, después de hacer unas cuantas soldaduras de prueba, corregir la composición de manera que todas las transformaciones, a fin de cuentas, diesen el metal requerido de la costura. Pero deberá tenerse en cuenta que la composición del fundente incide no sólo sobre el carácter de las reacciones. Cada componente, a su manera, modifica asimismo las propiedades físicas del fundente, de las cuales también depende la calidad de la costura.

Por ejemplo, si en el instante en que el baño se cristaliza, el fundente resulta muy viscoso, la superficie de la costura obtendrá la forma de corteza de escoria solidificada. Cuando se sueldan costuras anulares la escoria no tiene que ser demasiado fluida, puesto que al escurrir arrastrará consigo el metal del baño. En todos los casos la escoria solidificada deberá separarse con facilidad de la costura. Durante la fusión del fundente tienen que desprenderse gases que aparten el aire del arco, pero los mismos no deberán ser nocivos para la salud.

La soldadura bajo el lecho de fundente, hasta el presente, no ha agotado sus posibilidades, sin embargo, los problemas planteados por la revolución técnico-científica obligaron a los científicos a buscar otros caminos para unir nuevas aleaciones. No obstante, antes de que en la práctica se

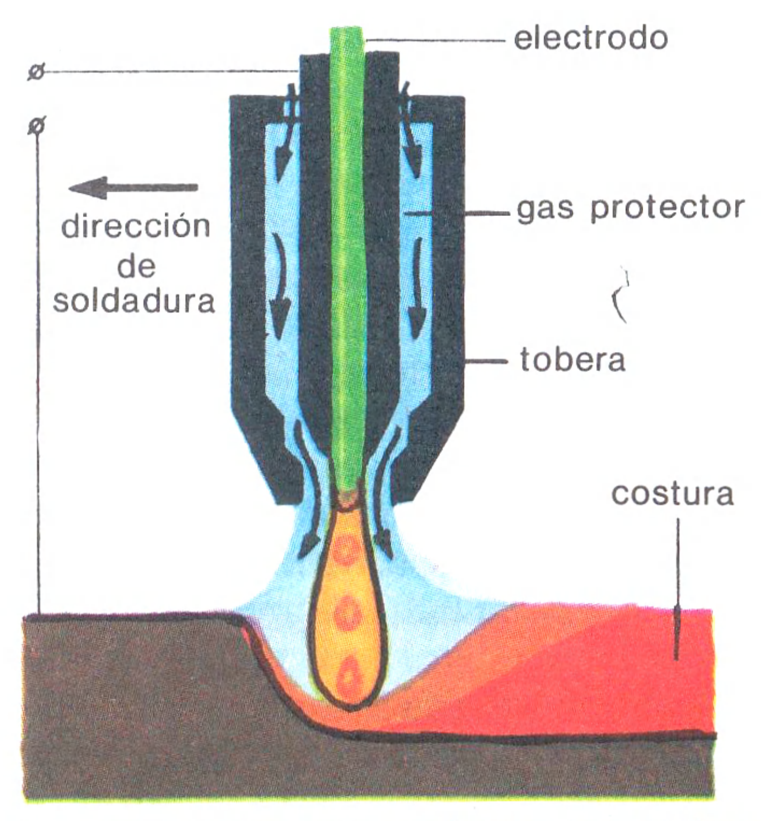
aplicasen nuevas fuentes de energía y un procedimiento para mejorar la calidad del metal como lo es el vacío, el baño obtuvo un nuevo medio de protección: el gas.

Pantalla gaseosa para el metal más resistente. Ya N. N. Benardos propuso suministrar gas hacia la zona donde arde el arco. El gas combustible, que él aplicó, simultáneamente caldeaba el lugar de soldadura y desalojaba del metal fundido el aire. Más tarde fueron propuestos algunos otros gases y procedimientos para su empleo, sin embargo, no se logró un mejoramiento notorio de la calidad, ni tampoco aumentar la productividad.

El proceso de soldadura al arco en gases protectores transcurría con muy poca estabilidad (sobre todo con electrodo fundible). Era difícil trabajar con semejante arco, mientras que para mejorar sus propiedades tecnológicas se necesitaban fuentes alimentadoras especiales, alambre de determinada composición, gases puros y baratos, así como mecanismos seguros para suministrar el alambre.

Para aquel entonces (postrimerías de los años 40 y comienzos de los 5), cuando los científicos de nuevo prestaron atención a la soldadura en gases protectores, algunos problemas en principio fueron resueltos gracias a los logros de la soldadura bajo el lecho de fundente. Es más, la electrotecnia se pertrechó con nuevos elementos, de los cuales se podían crear rectificadores de soldadura eléctrica con característica prefijada o regulable: estabilizadores que aseguraban la constancia de la velocidad de suministro del alambre, etc.

Los científicos que se ocuparon de los nuevos métodos de soldadura al arco, orientaron su atención fundamental a la investigación del carácter de fusión del alambre para electrodos. Los soldadores soviéticos se vieron obligados a ocuparse también de tareas metalúrgicas. Demostraron que como medio protector se podía emplear el gas carbónico barato. Verdad es que dicho gas, en condiciones del arco se



La soldadura en gases protectores se ejecuta con sopletes, a través de los cuales, a la zona del arco se suministran gases activos o inertes.

disocia y el oxígeno sobrante oxida el metal. Con el fin de que no se consuman el hierro y otros elementos, que integran la composición del acero sujeto a soldadura, se propuso introducir desoxidantes, es decir, elementos con mayor afinidad al oxígeno que el material básico. Al soldar una multitud de marcas de aceros se logró compensar la acción oxidante, añadiendo una cantidad complementaria de elementos corrientes para los aceros, a saber, silicio y manganeso. Para unir artículos de aceros de alta aleación, en el alambre de soldadura, además, se añade cromo, titanio, niobio y aluminio.

Los científicos de los EE. UU. fueron por otro camino. Para proteger la zona de soldadura aplicaron gases inertes: argón y helio. Dichos gases prácticamente no entran en reacciones químicas con los elementos de las aleaciones que se sueldan. Lo que significa que calcular la composición del

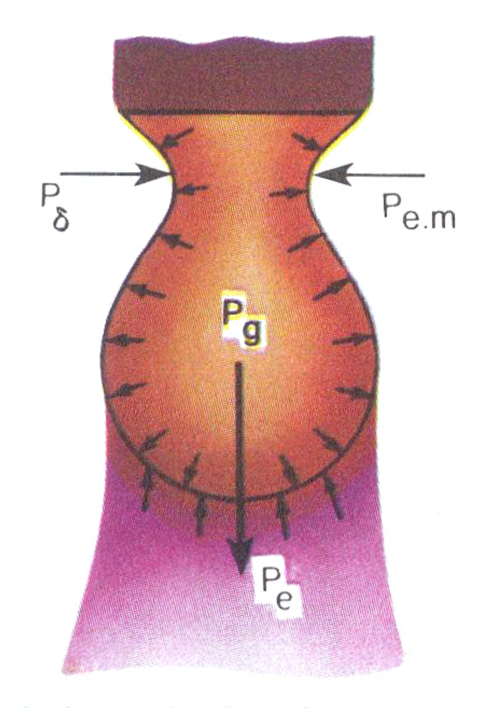
alambre para electrodos resulta más fácil, basta sólo con considerar cuánto y cuáles elementos se evaporarán, aumentando en correspondencia su cantidad. Los métodos de soldadura en gases protectores carecían de las insuficiencias inherentes al procedimiento de soldadura bajo el lecho de fundente, pero poseían deficiencias propias esenciales, por ejemplo, las salpicaduras del metal. Esto suscitó la necesidad de ejecutar abundantes investigaciones científicas sobre las particularidades de la fusión del electrodo.

Desprendimiento y vuelo de la gota de metal del electrodo. Relevantes científicos-soldadores encabezaron las mencionadas investigaciones. Se ejecutaban experimentos recurriendo a novísimos aparatos: cámaras cinematográficas rápidas y ultrarrápidas, oscilógrafos de bucle y de rayos catódicos, láseres, instalaciones de rayos X y otros. Los resultados de los experimentos se procesaban en ordenadores. A base de los resultados obtenidos en el cálculo se trazaban gráficos y se compilaban tablas.

¿Por qué y para qué de repente le prestaron tanta atención a una gotita tan pequeña?

Porque esas pequeñas gotas salpicaban el equipo y, en primer lugar, las toberas de los sopletes, aumentando las pérdidas del costoso alambre para electrodos. Porque estas pequeñas gotas, en vuelo caótico, no siempre van a parar al baño de soldadura.

La fuerza de la gravedad (P_g) al soldar en posición inferior contribuye al desprendimiento de la gota, mientras que en posición en techo, retiene la gota en el tope del electrodo. La fuerza electromagnética de compresión (del conductor con corriente) ($P_{c.\,m}$) tiende a estrechar el cuello de la gota que une el metal fundido con el electrodo y de esta manera coadyuva al desprendimiento de la gota. La fuerza de tensión superficial (P_δ) siempre atrae la gota hacia el electrodo, pero la magnitud de esta fuerza decrece a medida



El carácter de fusión del electrodo, las dimensiones de la gota y las particularidades de su desplazamiento, dependen de las fuerzas que obran sobre ella.

que aumenta la gota. La fuerza reactiva de evaporación (P_e) oprime la gota desde el arco.

Los científicos no sólo desentrañaron la naturaleza de la acción de las fuerzas, sino que además encontraron procedimientos, con ayuda de los cuales se logró reforzar o disminuir la influencia de las diferentes fuerzas y, de esta manera, cambiar el carácter del traslado de la gota.

Uno de los procedimientos más eficaces consiste en incidir sobre la fuerza electrodinámica. Se crearon fuentes especiales de alimentación en las cuales a la corriente fundamental del arco se añadían impulsos eléctricos.

Los parámetros de los impulsos (corriente, tensión, potencia) variaban de acuerdo a un programa determinado y antes de que se formase una gota gruesa, el efecto pinch (campo magnético) con gran fuerza "oprimía" el cuello de la gota y la arrojaba estrictamente por el eje del electrodo. 100 gotas por segundo lanzaba semejante electrodo.

En la actualidad, la técnica de soldadura dispone de un

gran conjunto de las más diversas fuentes de alimentación que facilitan la soldadura y ayudan a obtener costuras de alta calidad. Mientras tanto, los trabajos tendientes a mejorar las fuentes de alimentación continúan. En el futuro estas fuentes recibirán la información sobre la marcha del proceso de soldadura y reaccionarán a todas las desviaciones de los parámetros prefijados del régimen. Se obtendrán resultados aún mejores cuando los circuitos de retroacción consideren la calidad de las costuras soldadas.

Con el fin de mejorar la calidad de la soldadura también se elaboraron alambres especiales para electrodos. En el procedimiento de soldadura al arco con electrodo de polvo, los soldadores lograron compaginar las ventajas de las protecciones a base de escoria y de gas, asegurar la protección de la zona de soldadura contra el aire circundante, alear el metal de la costura y estabillizar el arco. Además, se conservaron las variantes de soldadura automática y semiautomática.

Soldabilidad de los metales. Los últimos trabajos de los científicos pusieron en manos de los soldadores tales materiales para soldar, que aseguran alta calidad al unir casi todos los tipos y clases de aceros. Dijimos "casi" porque las posibilidades de la soldadura no son ilimitadas. Las propiedades fisicas y químicas de algunas aleaciones, muy necesarias para la industria, son tales que con cualquier método de soldadura aparecerán grietas, zonas de elevada fragilidad, poros. Las propiedades de las aleaciones dependen de la cantidad de elementos aleantes, pero incluso los mejores de ellos no se pueden introducir ilimitadamente. La ciencia de soldadura hoy día puede predecir qué aleaciones se soldarán bien y cuáles, mal. Tomemos, por ejemplo, el acero.

El contenido de carbono, manganeso y toda una serie de otros elementos influye, en diferente grado, sobre la soldabilidad de los aceros. Por eso su acción se compara con la influencia del carbono, reduciéndola al equivalente de carbono.

Los científicos establecieron que la acción negativa del cromo y molibdeno es aproximadamente 5 veces; la del manganeso, 6; la del silicio, 24; la del vanadio, 14 veces menor que la ejercida por el carbono. Para saber qué cantidad de elementos aleantes se puede introducir en los aceros de baja o mediana aleación, existe la siguiente fórmula para el equivalente de carbono:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}.$$

En lugar de los símbolos se pone el contenido en porcentaje de los elementos y así se determina C_{eq}. Una unión fiable de acero en chapas gruesas, sin recurrir a procedimientos especiales, se puede obtener a condición de que el equivalente de carbono en el metal de la costura no supere el 0,47%. En caso de que el contenido calculado que corresponde al equivalente de carbono resulte mayor, para evitar la aparición de grietas deberá utilizarse el calentamiento previo. A veces en la composición de la costura se introducen elementos que reducen la tendencia al agrietamiento (por ejemplo, titanio).

La fórmula del equivalente de carbono para los aceros se obtuvo por vía experimental y no siempre refleja el cuadro exacto de cómo interaccionan los distintos elementos en el baño de soldadura y varían las estructuras, al enfriarse el metal de la costura. Por eso, para determinar la soldabilidad, los científicos sueldan probetas de forma especial, investigan la microestructura del metal recargado, etc. Si bien es verdad que la soldabilidad de muchas aleaciones es ya conocida hace mucho tiempo. Se sueldan bien el acero pobre en carbono y el aluminio técnicamente puro. Se destacan por su baja soldabilidad las fundiciones y la mayoría de aleaciones al cobre y zinc.

Presenta especial complejidad la soldadura de metales heterogéneos que difieren uno de otro por sus propiedades.

Los científicos se ven obligados a elaborar procedimientos especiales de soldadura, así como materiales especiales para la misma, debido a la gran diferencia de temperaturas de fusión y ebullición (por ejemplo, en las combinaciones hierro – zinc, tungsteno – plomo), a la formación de compuestos intermetálicos frágiles (aluminio – cobre, hierro – titanio) y a otras causas.

Incluso la soldadura de metales homogéneos, incluidos los puros, que poseen buena soldabilidad (tales como el aluminio y titanio), tienen sus particularidades, que deberán tomarse en cuenta por los científicos.

Soldadura pesada de un metal ligero. En la naturaleza el aluminio se encuentra con gran frecuencia y ocupa el tercer lugar, después del oxígeno y silicio, siendo el primero entre los metales. Esto lo debe a sus propiedades valiosas, sobre todo, a su pequeña densidad, elevadas conductibilidades térmica y eléctrica, alta ductilidad y buena resistencia a la corrosión.

El aluminio se emplea con profusión en muchas ramas de la técnica, en algunas de ellas ha desplazado el acero, la fundición y el cobre. Sin embargo, obtener una unión soldada de calidad a partir del aluminio es una tarea muy difícil a causa de sus propiedades físicas y químicas singulares. A pesar de que el aluminio posee una relativamente baja temperatura de fusión (660°C), debido a sus altas conductibilidad térmica y capacidad calorífica, así como gran calor latente de fusión, para crear el baño de soldadura se requiere una considerable cantidad de calor.

En la superficie del aluminio, al entrar en contacto con el aire (o con otro medio que contenga oxígeno), al instante se forma una película sólida de óxidos, la cual protege bien el metal contra la corrosión. Para fundir esa película se necesitan altas temperaturas. Fundirla es tan difícil como una tetera de hierro en la que hierve agua (la diferencia de

temperaturas de fusión de estos pares de sustancias es aproximadamente igual).

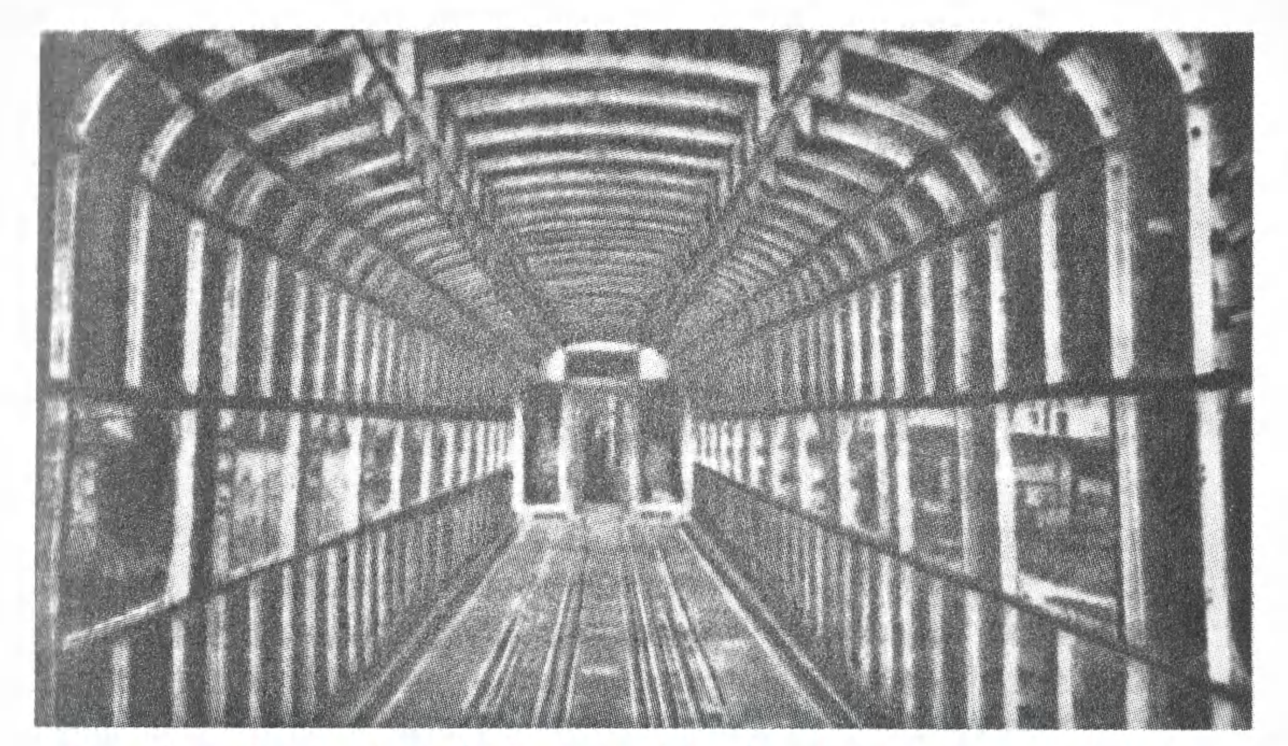
En principio, para los soldadores no es difícil fundir el hierro antes de que hierva el agua. Pero como ustedes ya saben, la tarea de los soldadores es más complicada pues deberán obtener una unión de calidad. La película de óxidos del aluminio, cuyo espesor crece bruscamente con el aumento de la temperatura, obstaculiza la fusión de los bordes. Sus cascajos quedan en el metal del baño, empeorando la resistencia mecánica y la hermeticidad de la unión.

Los medios más eficaces para eliminar la película de óxidos resultaron ser la acción de la corriente eléctrica y la interacción química con los elementos del grupo de halógenos. En la naturaleza se conocen muchos compuestos que contienen halógenos, es decir, cloro y flúor, sin embargo, para aplicarlos como fundentes de soldadura la elección queda limitada por exigencias especiales, entre ellas, la temperatura no muy elevada de fusión (600–700°C). Estas exigencias las satisfacen las sales halógenas de metales alcalinos y alcalinotérreos (NaF; $LiCl$; $NaCl$; KCl; Na_3AlF_6), que sirvieron como base para fundentes y revestimientos de los electrodos.

Después de determinar la composición y preparar los fundentes, resultó que el arco no ardía debajo de ellos. Verdad es que este último se excitaba de manera normal, pero en cuanto se formaba el baño con el fundente líquido sobre el mismo, el arco comenzaba a arder muy inestable, el régimen de soldadura se alteraba. La causa de este fenómeno se descubrió pronto: los fundentes en estado fundido poseen alta electroconductibilidad y shuntan el arco. La corriente desde el electrodo circula, en lo fundamental, no a través del espacio plasmático del arco, sino atravesando el fundente líquido circundante.

¿Cómo obligar a la corriente a pasar a través del arco, sin modificar la composición del fundente?

Los científicos disminuyeron la altura de la capa de fun-



Las vigas de aluminio de la armazón y las chapas de revestimiento de un vagón para el tren eléctrico rápido, se unen mediante soldadura en una estructura, capaz de soportar grandes cargas dinámicas.

dente de manera que ésta fuese menor que la longitud del espacio del arco. Ahora una parte del arco ardía por fuera y, por consiguiente, este método ya no se podía llamar "soldadura bajo el lecho de fundente".

El método de soldadura a través del fundente posee muchas cualidades positivas y encontró amplia aplicación en la industria. Empero sus insuficiencias, a saber, la imposibilidad de emplearlo cuando se suelda en diferentes posiciones espaciales y la reducción de la resistencia a la corrosión, debida a los residuos de fundentes de metal de la costura en la superficie de la costura, obligaban a continuar las investigaciones y elaborar métodos de soldadura en gases inertes con electrodos fundibles y no fundibles. En este caso, el artículo se conecta hacia el potencial negativo de la fuente de alimentación, o el arco se alimenta por corriente alterna. La película de óxidos en la zona de soldadura se somete a la pulverización catódica.

En lucha por aumentar la velocidad de movimiento. La labor de búsqueda en la investigación científica de los soldadores no culmina con la creación del método de soldadura y del equipo correspondiente. Con frecuencia la aplicación de un nuevo método de soldadura para tal o cual artículo, la elaboración de la tecnología concreta, desembocan en una búsqueda científica compleja, en la cual no sólo participan los científicos, sino también obreros, técnicos e ingenieros fabriles. Sin una actitud seria y creativa en el trabajo de todos aquellos que en la producción participan en la asimilación de los nuevos equipos y tecnología, sería imposible lograr éxitos.

Un ejemplo de colaboración semejante entre la ciencia y la producción lo encontramos en el trabajo conjunto de los colaboradores de los institutos de investigación científica con los trabajadores de las fábricas de vagones de Kalinin y Riga para crear vagones de pasejeros a base de aleaciones de aluminio.

Con el fin de aumentar la velocidad de movimiento, es imprescindible disminuir el peso de los vagones. Por lo cual se decidió elaborar la estructura y la tecnología para fabricar un tren eléctrico de pasajeros recurriendo a aleaciones de aluminio. En la especificación de proyecto de la "Ruskaya troika" fue propuesta la velocidad de 200 km/h. Esta exigencia podía cumplirse sólo a condición de reducir al mínimo el peso y elevar al máximo la resistencia mecánica de los vagones.

En los tradicionales vagones de acero, la carga fundamental recaía sobre una viga dorsal potente en la cual se apoyaba toda la carrocería. En el nuevo vagón de aluminio se prescindió de esta viga de gran peso. Sus funciones recayeron sobre las paredes laterales que perciben la carga de las demás unidades.

Minuciosas investigaciones permitieron elegir cuatro métodos de soldadura que, para determinados grupos de

uniones, resultaron ser los óptimos. En el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" se calculó el orden de operaciones de montaje y soldadura de elementos y unidades a fin de obtener las mínimas deformaciones y tensiones. Como resultado, el peso de un vagón soldado por entero en la fábrica de Kalinin, al reemplazar el acero por aluminio, se redujo desde 51 hasta 26 t.

Metal que absorbe el aire. Es raro aquel, a excepción de los soldadores, que pueda llamar de esta manera al titanio, ese plateado y blanco metal que posee, por lo menos, dos propiedades insuperables: elevada resistencia específica (es decir, resistencia mecánica referida a la densidad) incluso a la temperatura de 500°C y perfecta resistencia a la corrosión en muchos medios agresivos. El metal "eterno" ya es insustituible en la construcción de maquinaria química, en la industria aeronáutica, en la radioelectrónica, en la construcción naval y en la industria alimenticia. De titanio ya se construyen también obras monumentales. Una de las primeras fue el obelisco en memoria del lanzamiento en la URSS del primer "sputnik" de la Tierra, inaugurado en el año 1964, en Moscú.

Soldar el titanio es difícil. La dificultad se debe a su elevada actividad química a altas temperaturas. Este metal calentado poco más de 400°C, comienza a absorber oxígeno, nitrógeno e hidrógeno y se estropea a simple vista: cambia de color, disminuyen su ductilidad y viscosidad, en las costuras soldadas aparecen grietas en frío. Pero lo más peligroso consiste en que la unión puede rajarse al cabo de varios meses.

No obstante, es necesario soldar artículos de titanio. La resistencia mecánica de las aleaciones de titanio es aproximadamente de 100 kg/mm^2 y casi alcanza los índices de resistencia propios a los aceros aleados, mientras que su densidad (4,5 g/cm^3) es casi dos veces menor que la del acero.

Parece como si ese metal se hubiera creado especialmente para las más diversas estructuras cósmicas.

El módulo lunar de la nave cósmica "Apolo" fue soldado por los ingenieros de los EE. UU. en una cámara llena de argón puro. En cuanto en la cámara aparecían gases nocivos, especiales gasoanalizadores que controlaban la pureza del argón, de inmediato automáticamente desconectaban el equipo soldador.

De titanio sería muy bueno producir enormes reactores químicos, así como chimeneas fabriles con una altitud de centenares de metros. Pero el costo de las cámaras para semejantes artículos y el trabajo de los soldadores en escafandras no se podría amortizar, incluso, contabilizando todas las ventajas de servicio del titanio. Por eso es más fácil y barato soldar el titanio en condiciones atmosféricas comunes.

Para proteger el sector colindante a la costura y que se calienta hasta más de 400°C, se han elaborado dispositivos especiales: boquillas alargadas y escudos de protección que se fijan a los sopletes, a través de los cuales se suministra el argón. La soldadura al arco del titanio y de sus aleaciones, se puede ejecutar tanto con electrodos fundibles en argón, como con electrodos no fundibles en argón y bajo el lecho de fundente. Sin embargo, la mejor calidad del metal de la costura se obtiene al emplear fundentes especiales en forma de pastas. Este método reúne en sí las ventajas del procedimiento de soldadura del titanio bajo el lecho de fundente y de la soldadura con electrodos no fundibles en argón. Los fundentes y las pastas-fundentes poseen una particularidad: en su composición no tendrán que figurar sustancias que contengan oxígeno, por eso en lo fundamental se harán de fluoruros y cloruros de los metales alcalinos y alcalinotérreos. Los emplames de gran espesor se unen aplicando el método de soldadura eléctrica bajo el lecho de escoria. Al soldar titanio, sobre la superficie del baño de escoria se hace pasar argón.

Bajo el arco uno de los metales más viejos. El cobre es un metal conocido desde los tiempos más remotos, que en el período de la revolución técnico-científica, juega un gran papel en aquellas ramas de la industria donde se precisan sus excepcionales conductibilidades eléctrica y térmica. Ademas, el cobre posee una resistencia lo suficiente buena a la corrosion, se maquina con facilidad, es estable en cuanto a la transición al estado frágil, incluso a temperaturas del frío profundo. El cobre obtuvo gran difusión en la electrotecnia, en instalaciones frigoríficas; de él se hacen muchas piezas de los equipos para soldadura, que funcionan en condiciones complejas de temperatura: toberas de sopletes, cristalizadores enfriados por agua, correderas que limitan el baño de escoria.

Es evidente que los soldadores no quedaron en deuda ante un metal tan importante para ellos. En principio, el cobre tiene buena soldabilidad, no obstante deberán tenerse en cuenta las siguientes propiedades suyas como: 1) fácil oxidabilidad en estado fundido, surgiendo el óxido cuproso (éste se concentra en los límites de los cristales y como consecuencia aparecen grietas); 2) resistencia reducida contra la porosidad debida al desprendimiento de vapor de agua durante la cristalización; 3) elevada conductibilidad térmica; 4) alta fluidez en estado líquido; etc. En el presente, para fabricar artículos de cobre se emplean tanto los viejos métodos de soldadura al arco (con electrodo de carbón, manual con electrodos revestidos), como los nuevos (bajo el lecho de fundentes, en gases protectores, con sopletes de plasma). En calidad de gases protectores, para soldar el cobre se emplean, además de los inertes, el nitrógeno e incluso el hidrógeno. Si el metal tiene un grosor mayor de 4 mm, por lo común, se suelda calentándolo de antemano.

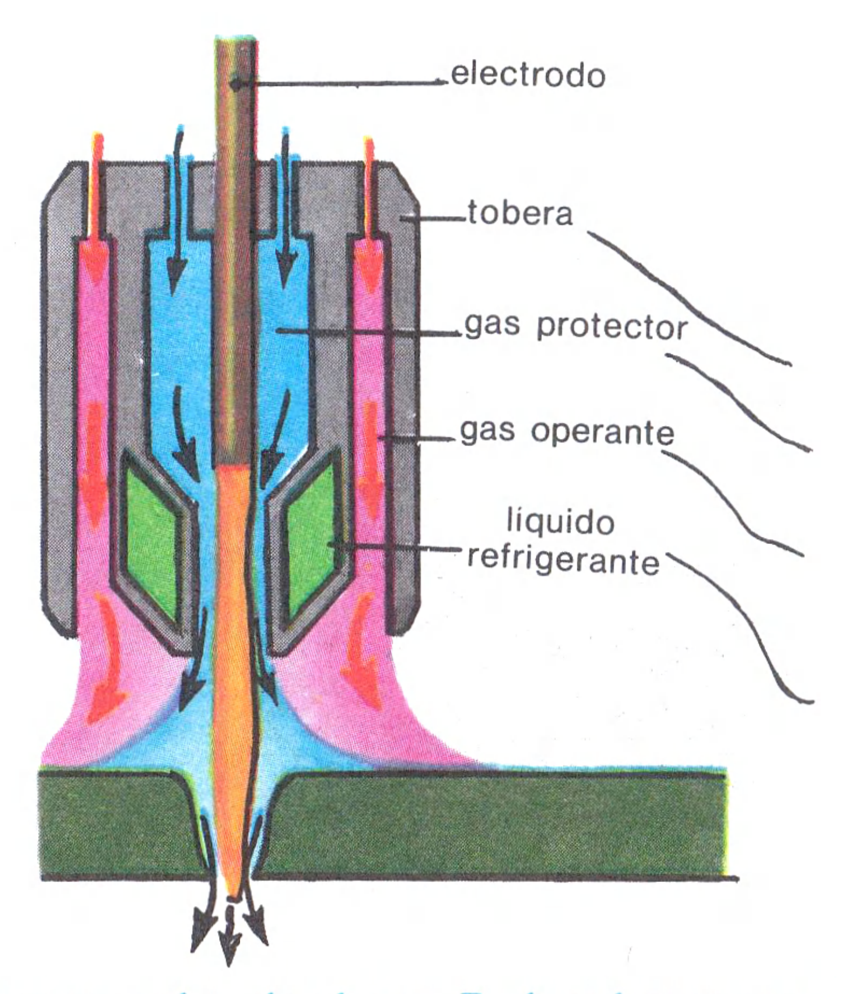
Resulta más difícil soldar el latón (aleación de cobre). A fin de evitar la evaporación de los componentes fusibles, sobre todo, del zinc, se han elaborado procedimientos tecnológicos especiales.

En los laboratorios de los soldadores se trabaja con nuevos metales. A medida que se desarrollan nuevas ramas de la técnica, se amplía el uso de metales poseedores de distintas propiedades, en la mayoría de los casos únicas. Pero las particularidades de cada metal, con frecuencia, obligan a crear procedimientos especiales de soldadura.

Examinemos algunas de esas aleaciones. El níquel posee altas resistencias a la corrosión, a altas temperaturas, así como considerable resistencia óhmica. Al fabricar aparatos para la industria química y electroquímica, empleando aleaciones de níquel, la soldadura que más se aplica es la de al arco en argón con electrodo de tungsteno, que desplazó todos los demás tipos de soldadura al arco. La tecnología para soldar dichas aleaciones, tiene grandes semejanzas con la tecnología para soldar aceros aleados, sin embargo, el níquel es mucho más propenso a la formación de poros. Por eso en la zona de soldadura es intolerable la presencia de nitrógeno y oxígeno.

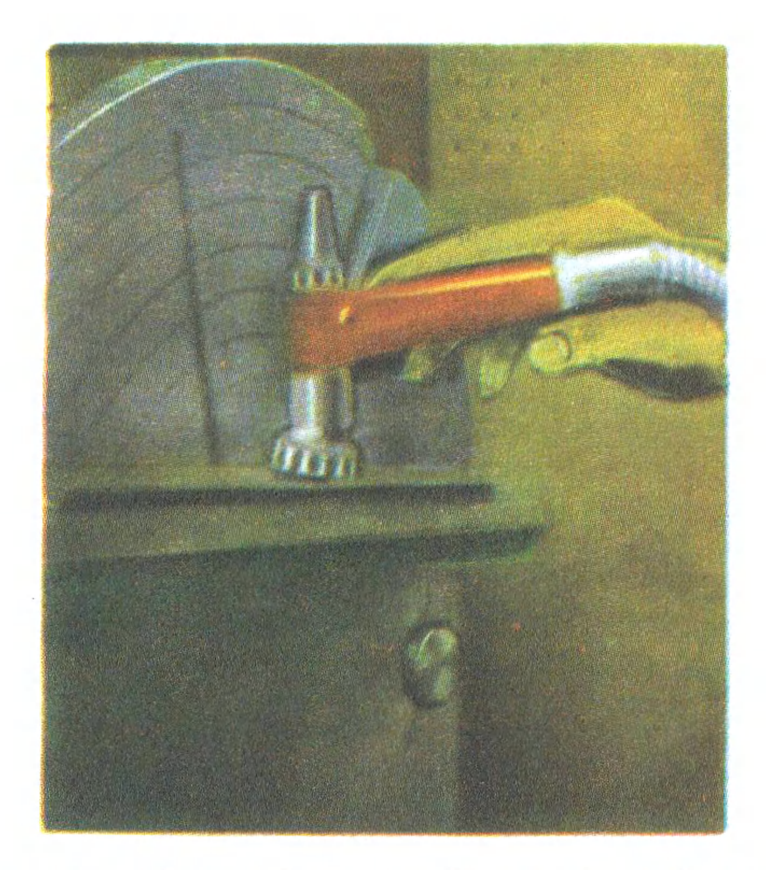
La mayor dificultad para los soldadores reside en la soldadura de metales poco fusibles (y aleaciones a base de los mismos): zirconio, niobio, tungsteno, vanadio, molibdeno y otros. Estos metales se emplean en estructuras de elevada responsabilidad (entre ellas, en reactores nucleares, en sistemas coheteril-espaciales), por lo que los requisitos que se plantean ante las uniones soldadas son los más severos. Junto con magníficas propiedades de servicio, estos metales también poseen particularidades tecnológicas negativas: tendencia a formar fisuras, elevada temperatura de fusión, propensión a entrar en reacción con los gases atmosféricos a elevada temperatura, fragilidad cuando se sobresaturan con gases.

Cuando se trata de resolver problemas de unir nuevos metales, las posibilidades mayores pertenecen a los métodos de soldadura de elevada concentración de energía. Los soldadores se afanan por buscar toda clase de procedimientos para contraer la descarga del arco que es la fuente de calor más difundida y universal. Si el arco se comportase como un



Soldadura con soplete de plasma. En los plasmatrones modernos para soldadura, la temperatura del arco sobrepasa de 30 000°C, siendo la densidad del flujo térmico igual a 300 kW/cm^2.

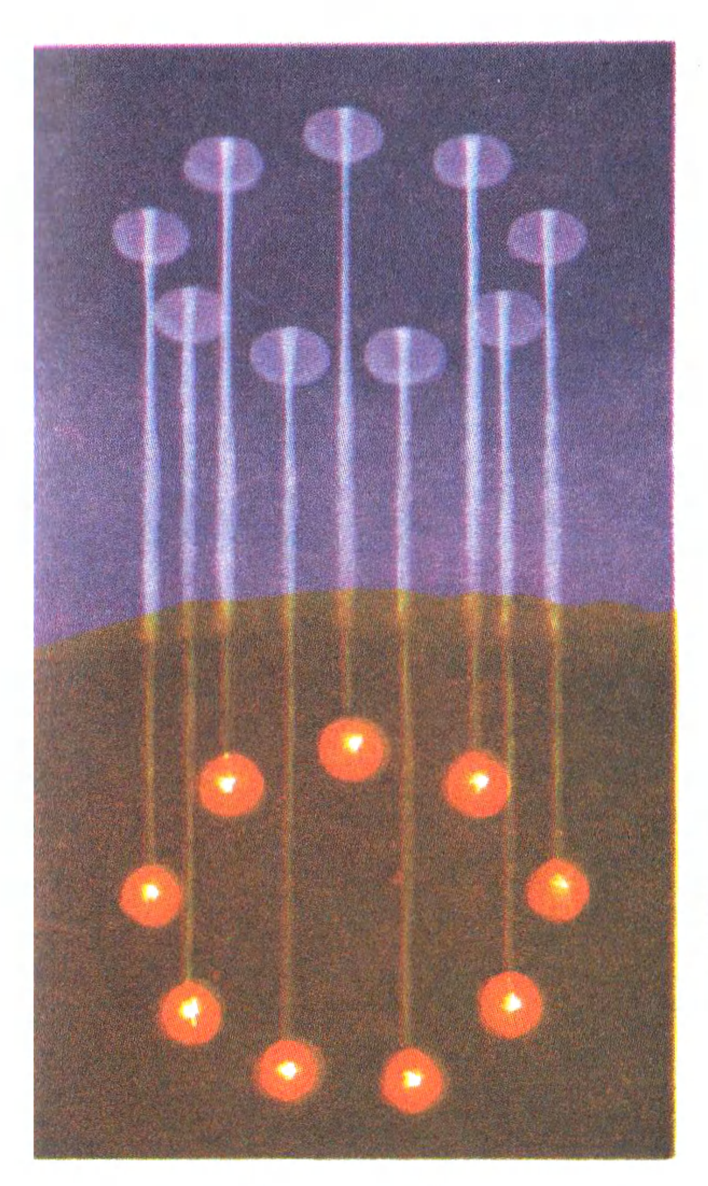
conductor metálico corriente, entonces se podría aumentar la densidad de la corriente en la columna y en las manchas activas mediante un simple incremento de la intensidad de la corriente en el circuito de soldadura. Sin embargo, los procesos mencionados conducen a que simultáneamente con el aumento de la corriente, se incrementa también el diámetro de la columna. La cantidad de calor desprendida en el arco crece, pero la concentración de aquél y la temperatura casi no aumentan. Sólo gracias al estrechamiento del arco en sopletes-plasmatrones especiales se logra aumentar la concentración de energía y la temperatura media másica, lo que proporciona un efecto tecnológico notorio.

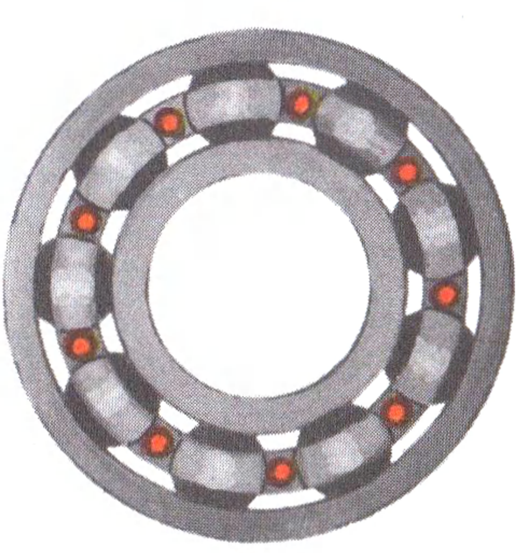


La soldadura con microsopletes de plasma adquirió gran popularidad rápidamente en la fabricación de instrumentos, joyería, electrotecnia y en otras ramas de la industria que producen artículos delicados.

Recientemente se han creado plasmatrones en los cuales en vez de argón, en calidad del elemento conformador del plasma, se emplea el dióxido de carbono por ser barato. Quedó descubierto el camino para la soldadura de aceros corrientes con soplete de plasma, surgiendo la posibilidad de elevar la velocidad de soldadura de metales con espesor medio hasta varios centenares de metros por hora.

Claro que los soldadores no podían perder de vista las fuentes luminosas de calor. Los científicos de diferentes países, que se ocupan de problemas de soldadura, seguían con atención los logros alcanzados por los fisicos en el terreno de la óptica y de la técnica de láseres. No sólo se interesaban por ellos, sino que realizaban de manera intensiva sus propias investigaciones, tan necesarias para la aplicación práctica en la soldadura.





Después de dominar el haz electrónico, los soldadores obtuvieron la posibilidad de ejecutar costuras de forma compleja. Con un haz electrónico fragmentado se pueden unir simultáneamente piezas en unos cuantos puntos.

Las primeras investigaciones ya mostraron que el rayo luminoso tiene ciertas propiedades únicas. No exige el vacío, puesto que puede atravesar, sin debilitarse, una capa considerable de aire. Es más, el calor se puede transmitir incluso a través de una envoltura de vidrio que recubra el artículo. Otra importante propiedad consiste en que los rayos no introducen a la zona de calentamiento impurezas de otras sustancias.

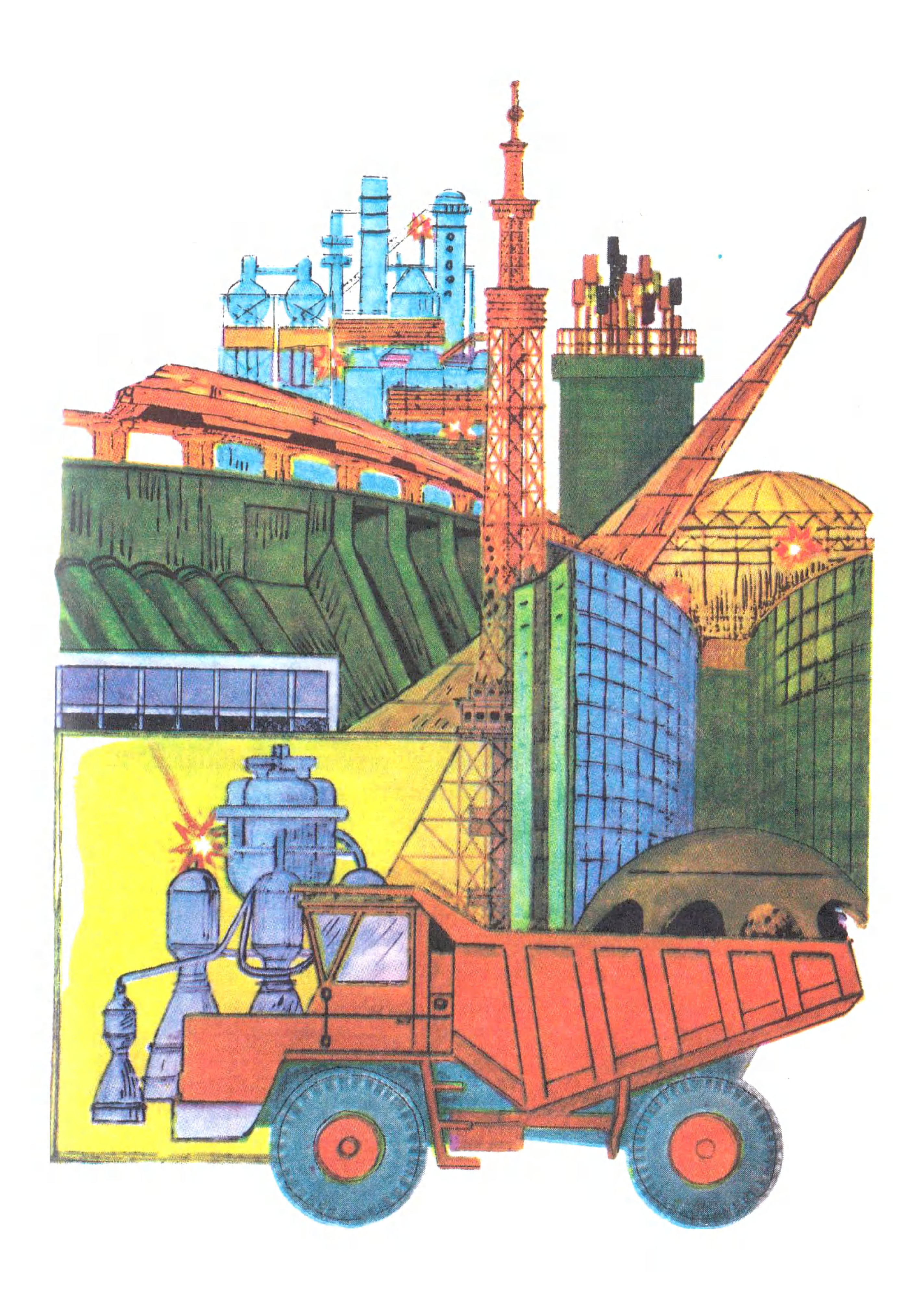
Los investigadores no dudan en algunas ventajas de la soldadura fotónica (a partir de una fuente artificial de luz) y de la heliosoldadura (a partir del Sol), además no está excluido que dentro de cierto tiempo los problemas inmediatos del desarrollo técnico-científico se resolverán con ayuda de nuevos métodos de soldadura.

A la vanguardia de la revolución técnico-científica

Mecanización y automatización compleja. Durante el diseño de puentes, vagones, máquinas, recipientes u otras estructuras, los especialistas procuran tener en cuenta los requerimientos de la ciencia de soldadura. Los diseñadores y tecnólogos desarticulan sus estructuras de tal manera que los grupos resulten cómodos para montarlos y soldarlos. Pero en ciertos casos sucede que montar y soldar el artículo de todos modos es incómodo e improductivo. Entonces los soldadores, por su propia iniciativa, modifican a fondo la estructura a soldar.

Cumplir un trabajo semejante no es sencillo. El soldador deberá tener profundos conocimientos de su oficio y además de aquella rama a la que pertenece la estructura soldada. Así mismo, tendrá que ser audaz, poseer intuición ingenieril y espíritu crítico.

Para transformar la producción, el soldador tiene que conocer y comprender todo el problema íntegro, poder mentalmente rechazar todo aquello que se considera perfecto y hallar una nueva solución más perfecta. Claro que no en todos los casos se precisa enfocar el asunto de esa manera. En el desarrollo de la técnica hacen falta innovaciones individuales, a simple vista, insignificantes. Sin embargo, en ocasiones, sin una transformación básica revolucionaria no se puede avanzar. Es entonces cuando hay que resolver tareas ingenieriles muy interesantes. Tales como, por ejemplo, el



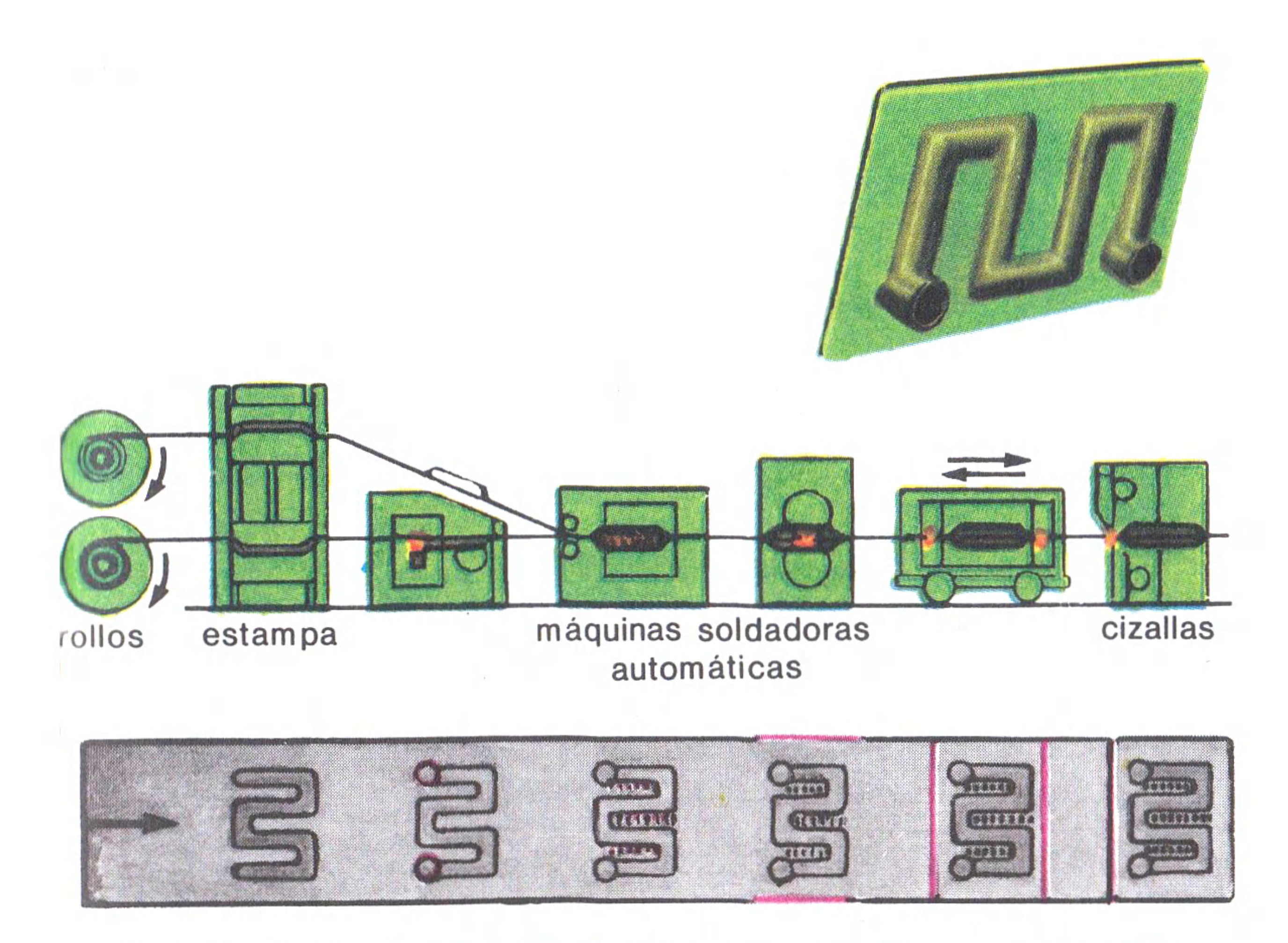
problema sobre el aparato doméstico de calefacción, sobre la conocida y habitual batería de radiadores de hierro colado.

Radiadores en el tren de soldadura o el "problema de la batería doméstica". La batería de hierro colado, hasta hace poco, era el aparato calefactor más perfecto para departamentos y locales de producción. En la URSS, el volumen de construcción crece de día en día. Por consiguiente hacen falta cada vez más y más radiadores de calefacción. Mientras tanto, para fabricar pesadas baterías de hierro se gasta mucho metal, hacia finales de los años 60, ese consumo había llegado al millón de toneladas por año. Es más, su montaje se complica debido a su gran peso, a lo laborioso y difícil que es armarla a partir de secciones individuales, a que se necesitan niples de rosca corrida. Además, una vez montadas en los recintos, tienen un aspecto voluminoso y concentran el polvo en sus laberintos.

Así pues, era necesario reducir el gasto de metal, mejorar el aspecto exterior del radiador, simplificar el montaje, automatizar el proceso de producción en masa.

Se logró resolver la tarea planteada por medio de la soldadura que cambió no sólo todo el proceso tecnológico, sino también la estructura del propio aparato calefactor.

Los radiadores de nuevo tipo producen de acero en chapas finas. Se sueldan dos preformas planas en las cuales se han estampado los canales para la circulación del agua. La producción comienza desenvolviendo dos rollos de acero. La cinta de acero, con una anchura igual a la altura de los futuros radiadores, pasa entre un par de rodillos en uno de los cuales hay salientes y en el otro, ranuras. Estos son el punzón y la matriz, es decir, los elementos operacionales de las estampas, sólo que en lugar del acostumbrado estampado periódico de cada preforma por separado, los rodillos forman en la cinta una preforma tras otra. Además, las preformas se mueven en forma de cinta con una velocidad de unos cuantos metros por minuto. Lo mismo ocurre con la segunda cinta,



Dos cintas de acero, después de pasar por la cadena de producción de radiadores, se convierten en artículos acabados.

sólo que a ella el equipo automático suelda los tubos de empalme. Ambas cintas se aproximan y en marcha se unen, primero con soldadura por puntos y, después, con costuras transversales y longitudinales, por medio de soldadura por contacto. Con el fin de no detener la cinta, incluso al soldar la costura transversal, el aparato soldador se mueve junto con las preformas y después retorna a la posición inicial con gran velocidad. Este aparato, con acierto, recibió el nombre de "volante". Queda por cortar, de la cinta en movimiento, el radiador acabado.

Los nuevos radiadores no recargan los departamentos, son higiénicos y poseen características termotécnicas más elevadas comparadas con las de los radiadores de hierro

colado. Casi 500 mil t de metal, cerca de 80 milliones de rublos por año, ese es el efecto económico de la sencilla solución del "problema sobre radiadores" con ayuda de la soldadura.

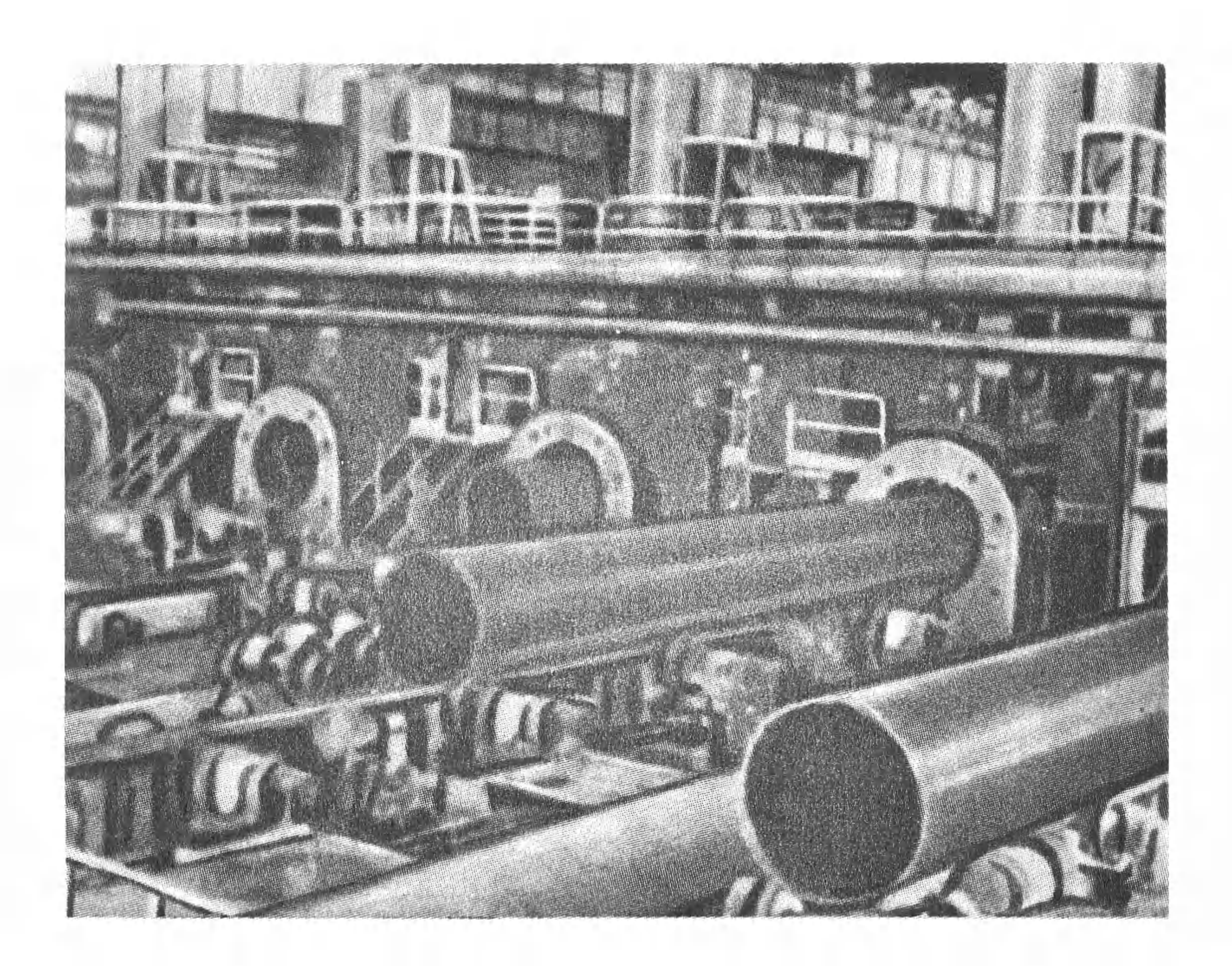
Otro problema más, "sobre tuberías". Soluciones técnicas originales y audaces están inmersas en las cadenas de producción donde se fabrican tuberías aplicando soldadura, montadas en empresas de laminación de tubos.

Las personas conocen las tuberías ya a lo largo de milenios. Primero comenzaron a emplearse tubos de bambú naturales, creados casi por completo por la propia naturaleza, después aparecieron los de cerámica y, por último, los metálicos que en la economía moderna tienen una gran importancia. Se fabricaban por laminado, colada, soldadura, trefilación y utilizando otros procedimientos. Cada uno de ellos tenían sus ventajas e insuficiencias. Así era hasta hace relativamente poco tiempo, cuando la humanidad necesitó petróleo y gas en enormes cantidades. Resultó que los principales consumidores de combustible y materia prima para la industria química se encuentran alejados de los yacimientos naturales. Miles de kilómetros de tubos hacen falta para las cañerías principales.

Mientras tanto, el diámetro de estas tuberías es de 1 a 2 m, su grosor, de 10 mm y más. ¿De qué manera transformar millones de toneladas de tochos de acero en tuberías herméticas y resistentes?

Excepto la soldadura, ninguno de los conocidos procesos tecnológicos podía hacer frente a ese problema. Los soldadores elaboraron e implantaron unos cuantos procedimientos para producir tubos be gran diámetro.

Uno de los principios consiste en el arrollamiento oblicuo (en espiral) de un rollo de banda en una pieza bruta cilíndrica. Ya que los bordes de la banda se empalman formando una espiral, estos tubos recibieron el nombre de tubos de costura en espiral, mientras que las líneas donde se

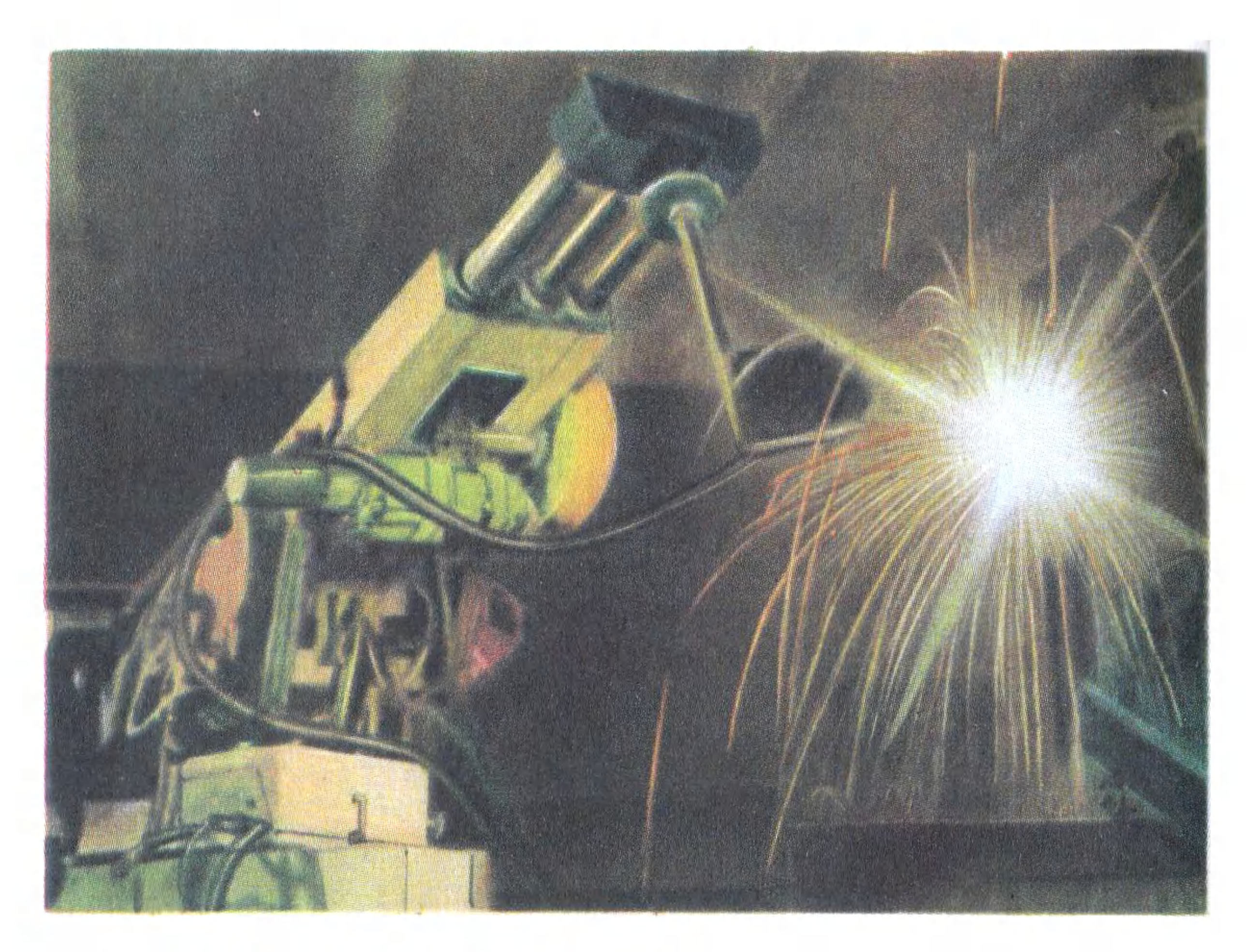


En este taller se sueldan tuberías.

producen los mencionados tubos: tren de soldadura. La primera operación que se hace en el tren es el desenvolvimiento del rollo de acero en tiras.

Las tiras se hacen pasar entre los cilindros enderezadores, cortándoles los bordes. La tira de acero se suministra hacia el dispositivo conformador. Allí se enrrolla formando un tubo y se suelda. Cuando se termina un rollo, su extremo es alcanzado por el comienzo del otro, ambos se empalman, comienza a trabajar un cabezal soldador especial y la costura une de firme las dos tiras.

Esta clase de trenes de soldadura están mecanizados por completo. A la persona sólo le resta controlar el trabajo de las máquinas. Cosa nada sencilla. A gran velocidad avanzan



El robot soldador «ИЭС-639».

los bordes de los empalmes bajo los cabezales soldadores, potentes arcos, hasta de miles de amperios, invisibles bajo la capa de fundente, funden el acero y tan sólo el hilo plateado de la brillante costura aparece a la salida del tren. Con precisión y seguridad deberá obrar el soldador-operador, reaccionando de inmediato ante las alteraciones del proceso. Un minuto de indecisión y decenas de metros de tuberías pueden quedar inservibles.

Por esa razón, el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" mantiene bajo su vigilancia, entre otros muchos problemas, el problema en cuestión y continúa elaborando nuevos procesos tecnológicos para la soldadura ultrarrápida en trenes. En un futuro próximo los bordes se calentarán por corrientes de alta frecuencia (radiotécnica),

desaparecerá de los trenes el fundente con el inevitable polvo que los acompaña, no hará falta seguir la posición del cabezal soldador y el suministro de alambre para electrodos. El control de los regímenes de soldadura se automatizará por entero. Los primeros trenes de soldadura de esta índole ya funcionan con éxito.

Robot-soldador de la primera generación. En el presente, la producción en masa de automóviles y máquinas combinadas, vagones y bicicletas, así como de muchos otros artículos, es inconcebible sin cadenas transportadoras. La soldadura en estas últimas está mecanizada por completo y se ejecuta con equipos automáticos. El soldador sólo tiene que poner en marcha los aparatos y controlar cómo transcurre la soldadura. Pero la velocidad de los procesos de producción se ha incrementado de tal manera que la persona no tiene tiempo de reaccionar a las desviaciones casuales del régimen. Fue preciso crear el robot, un dispositivo capaz de gobernar por sí mismo y ejecutar el programa de soldaduras a elevadas velocidades.

En las empresas industriales ya se emplean, en lugar de personas, robots que cumplen los trabajos físicos más pesados. Estos robots de la primera generación trabajan según un programa rígido. Por ahora no son capaces de reaccionar a las desviaciones de la marcha normal del proceso. Sin embargo, difieren de los aparatos automáticos y demás máquinas en que "aplican" procedimientos que el hombre efectúa con las manos. El robot posee una propiedad que no es inherente a los aparatos automáticos, a saber, el autocontrol. Los robots industriales no se parecen exteriormente al hombre. El robot es una máquina que por su aspecto exterior se asemeja a un cajón con un mecanismo accionador, que de por sí es una barra o, como la suelen llamar, la mano del robot. La barra, lo mismo que la mano del hombre, desplaza las piezas o los instrumentos hacia cierto punto del espacio, orientándolos en determinado modo.

La mano del robot se pone en movimiento por diferentes accionamientos: eléctricos, hidráulicos o neumáticos, que transmiten el movimiento a los correspondientes mecanismos. El movimiento queda definido estrictamente por la señal de mando que llega desde el dispositivo de control. Este último (dispositivo electrónico) no sólo dirige las acciones automáticas del robot, sino que asegura el enlace con las instalaciones de servicio y realiza la programación durante el adiestramiento. A base de semejantes robots, en el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" se ha creado un robot industrial soldador. El arte de un soldador cualificado se sustituyó por operaciones elementales programadas, cuya información el dispositivo electrónico almacena en su memoria. Gracias al memorizador electrónico, el robot puede adiestrarse siendo capaz de transformarse con rapidez para cumplir otros movimientos y, por lo tanto, puede trabajar junto con otros robots. El operador-soldador "enseña" al robot con anticipación. El propio operador a mano conduce el instrumento fijado en la muñeca del robot. La trayectoria por la que se desplaza el instrumento la memoriza el dispositivo electrónico. El sistema de enseñanza del robot debe ser sencillo. Después del adiestramiento, el robot ejecuta la soldadura autónomamente.

Los primeros robots soldadores fueron diseñados para ejecutar la soldadura por puntos con presión. El soldador pone el punto de soldadura en fracciones de segundo. Sin embargo, trasladar las tenazas con el electrodo desde un punto a otro (digamos a una distancia de 100 mm), detenerlas en un lugar determinado, orientar los electrodos durante todo el día de trabajo, resulta una tarea pesada. El hombre se cansa, pierde el pitmo, deja pasar algunos puntos. Teniendo en cuenta que el artículo permanece en la cadena de producción, donde cada varias decenas de segundos sale un automóvil o una máquina combinada, ya terminados; si el operario se distrae, la pieza bruta se le escapa; si no pone un punto, la resistencia mecánica disminuye. El robot, por el

contrario, no se cansa. He aquí por qué en la fábrica de automóviles de Gorki, soportaron con éxito las pruebas los primeros robots soldadores ИЭС-690, "instruidos" para ejecutar la soldadura por contacto. Después los colaboradores del Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", junto con los trabajadores de la fábrica de máquinas combinadas de Tula, crearon un robot para la soldadura por puntos al arco. En la actualidad el robot soldador, pertrechado de soplete, "aprende" a soldar costuras cortas y largas en todas las posiciones espaciales.

Los científicos, ingenieros y obreros continúan su búsqueda creadora. En turno están no sólo los trabajos tendientes a perfeccionar los robots de la primera generación, sino que también la creación de robots de la segunda generación, dotados de órganos capaces de percibir las condiciones de la soldadura.

Diversidad de problemas. Son cada vez más los trabajos de soldadura que se encomiendan a las máquinas. El desarrollo de la técnica de soldadura se supedita a la ley general del progreso técnico sobre la cual V. I. Lenin dijo: "En la sustitución del trabajo manual por las máquinas... consiste precisamente toda la labor progresiva del pensamiento humano. Cuanto más se desarrolla la técnica, tanto más se desplaza el trabajo manual del hombre, sustituyéndose por doquier con máquinas cada vez más complejas..."

En el último medio siglo, la soldadura de una operación auxiliar y para reparaciones se ha convertido en un proceso tecnológico rector de la industria moderna.

La ciencia de la soldadura se ha elevado a gran altura y se encuentra en condiciones de resolver las más variadas tareas. En ayuda de los científicos, diseñadores y tecnólogos, llegaron los ordenadores. En la URSS se ha creado una potente base de investigación científica, decenas de institutos especializados y ramales, decenas de cátedras en instituciones

de enseñanza superior, se ocupan de los problemas de la ciencia y de la técnica de soldadura. El Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", siendo el centro piloto de las investigaciones científicas, está encargado de coordinar las investigaciones relacionadas con la soldadura en la Unión Soviética.

Los adelantos de la ciencia de soldadura en la URSS han sido reconocidos en todo el mundo, sus trabajos se utilizan incluso directamente en la física y en otras ramas de la ciencia. Durante el experimento soviético-francés, único en su género, en el espacio cósmico circunterrestre, el cohete francés "Eridanus" levantó un cañón electrónico especial, creado en en el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón". Los electrones dominados por los soldadores "trabajaron" bien y suscitaron en la magnetosfera una aurora polar artificial.

Se impulsa con éxito la colaboración internacional entre soldadores. Han alcanzado grandes logros los científicos-soldadores de Bulgaria, Hungría, Polonia, Rumania y otros países. Hoy día, mediante los esfuerzos mancomunados de los soldadores de los países miembros del CAME, pueden resolverse los más complejos problemas. Como un ejemplo de ello se puede citar el equipo semiautomático unificado para la soldadura al arco y recargue "Intermigmag", diseñado por los científicos y proyectistas de Bulgaria, República Democrática Alemana, Unión Soviética y Checoslovaquia; la instalación para la soldadura por bombardeo electrónico de piezas de automóviles "ИЭС-ЦИС 700", creada por soldadores de la URSS y RDA.

El conjunto de tareas planteadas ante la ciencia de soldadura incluye no sólo la unión de metales y metaloides, sino también el espolvoreo y recargue de los mismos, estos importantes procesos tecnológicos se aplican para restaurar artículos u obtener piezas con propiedades especiales. Los soldadores se ocupan, asimismo, en buscar métodos de controlar las uniones soldadas sin alterar su integridad. La

ciencia de soldadura ya dió a la producción métodos tales de control como la gammagrafía, defectoscopia capilar y ultrasónica, rarefacción, buscafugas a base de espectrómetros de masas, etc.

Los soldadores atienden, además, los problemas vinculados al corte térmico y al cepillado de metales y metaloides, aplicando para estos fines la llama de gas, el plasma, la energía de explosiones, etc.

A base de los avances de la ciencia de soldadura y de su práctica, se ha creado una ciencia autónoma, así como una rama de la producción: la electrometalurgia especial. Recurriendo a los métodos de la electrometalurgia tales como: bajo el lecho de escoria, por bombardeo electrónico, con sopletes de plasma, se lorgó obtener aceros especiales y metales no ferrosos de muy elevada pureza, tan necesarios para la técnica moderna.

Al crear nuevos métodos de soldadura, los científicos prestan gran atención a las cuestiones relacionadas con la protección del trabajo y la defensa del medio ambiente contra la contaminación, debida a los desperdicios de la producción. En el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" existe un departamento dedicado a la higiene del trabajo, cuyos colaboradores realizan investigaciones médicas a fin de mejorar los distintos métodos de soldadura. Por ejemplo, para el procedimiento más antiguo, la soldadura manual al arco con electrodos revestidos, fueron creados de nuevo recubrimientos para electrodos, que durante la soldadura no desprenden compuestos volátiles tóxicos. Los científicos lograron además mejorar las propiedades de soldabilidad de los electrodos.

Los soldadores soviéticos comparten experiencias. Los científicos del Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón" están acostumbrados a recibir invitados. En detalle, con sencillez y convicción narran sobre la soldadura ante representantes de firmas extranjeras, a sus colegas de institutos afines, diplomáticos y obreros de diversas fábricas.

Pero en septiembre de 1972, en el mencionado instituto se recibió a huéspedes merecedores de una atención especial.

Jóvenes con los más distintos colores de piel, hablando en diferentes lenguas, con interés examinaban los aparatos, tomando en sus manos las probetas metálicas. En los días siguientes de nuevo acudieron al instituto y, al cabo de un cierto tiempo, ellos mismos ya oprimían los botones de los aparatos, familiarizándose con la novísima técnica y dominando cualquier metal.

Se trataba de los estudiantes que acudían a los cursos sobre soldadura, organizados por la ONU. Desde entonces la Unión Soviética capacita a especialistas procedentes de los países en desarrollo de América Latina, Asia y Africa. Con generosidad comparten su experiencia en la elaboración de los novísimos procedimientos los científicos e ingenieros del Instituto de soldadura eléctrica. Cada año, desde Kíev, a sus países retornan esos especialistas, llevando consigo una rica experiencia productiva y científica. Entre tanto, los resultados del trabajo aportado por los científicos soviéticos en la creación de nuevos métodos de soldadura, se multiplican en muchos países. La soldadura consolida no sólo el metal, sino también la amistad entre los pueblos.

Existe además de Asociación Internacional de Soldadores, el llamado Instituto Internacional de soldadura. Especialistas de 43 países del mundo anualmente se reúnen en congresos, donde discuten los problemas más serios de la ciencia de la soldadura, aprueban los resultados logrados en investigaciones, trazan las vías para el ulterior dominio del metal y el arco, del haz electrónico y de la explosión.

Extensión del espacio de trabajo

El 4 de octubre de 1957 comenzó la era cósmica de la humanidad. Por primera vez se lanzó al espacio circunterrestre el primer satélite artificial de la Tierra.

A pesar de sus modestas dimensiones, encarnó en sí los logros más modernos de la ciencia y de la técnica soviéticas.

Cuestiones de soldadura en los cosmódromos. La preparación para la conquista del cosmos comenzó mucho antes de que se lanzase el primer satélite artificial. Gran labor tuvieron que desplegar los proyectistas y constructores de fábricas y plataformas de despegue. También tocó participar a los soldadores. Sobre su aportación se puede juzgar aun que sólo sea, por el hecho de que en el centro cósmico "Kennedy" de EE. UU. se soldó la armazón del taller de montaje con un peso de 60 mil toneladas y una altura de 160 metros. Dentro de este taller está instalada una plataforma en la que se montan los complejos coheteriles. A la plataforma se ha soldado una enorme torre sujeta con nueve mástiles inclinados de acero altamente resistente con un peso total de 4725 toneladas. Todas las estructuras importantes en la plataforma lanzacohetes también están soldadas. Algunas de ellas tienen que funcionar en condiciones en extremo difíciles. El impacto de la potente llama, que surge en el cohete, lo soporta un potente divisor de llamas, empalmado mediante soldadura, cuyo peso es de 650 toneladas y altitud de 12,7 m. Además, los depósitos para el combustible, los sistemas que suministran ésta a los tanques y los propios tanques de los cohetes deberán soportar un extraordinario sobreenfriamiento. Su estructura no es nada sencilla, un tanque dentro de otro. La exactitud en su fabricación es elevada; sus dimensiones, enormes. La capacidad del depósito para el oxígeno líquido es de 340 200 litros. El diámetro de la esfera externa, es de 21,35 m. La esfera interna está soldada de acero inoxidable, la externa, de acero pobre en carbono. El espacio entre ellas está relleno con una masa perlítica especial. De manera análoga están estructurados los tanques para el hidrógeno líquido.

La cañería para el suministro de hidrógeno líquido es de una aleación a base de níquel. Esta cañería se encuentra

dentro de otra, fabricada de una aleación de aluminio. Las cañerías para suministrar keroseno y combustible superactivo se hacen de acero inoxidable y el tubo de alimentación con oxígeno líquido, de una aleación de aluminio. Es fácil decir "está hecho". Materiales diferentes, centenares de empalmes que no se pueden girar (es decir, el baño de soldadura se encontrará en todas las posiciones espaciales), y por si fuera poco, las más elevadas exigencias en cuanto a la calidad de las uniones soldadas. He aquí por qué además del control de la calidad de toda la costura por rayos X, que es lo común para la técnica cósmica, así como de las pruebas hidráulicas y neumáticas corrientes de los artículos, éstos se sometían a golpes térmicos especiales, consistentes en un enfriamiento rápido por medio de oxígeno o nitrógeno líquidos. Estas severísimas pruebas se deben a las condiciones "normales" en que funcionan las estructuras cósmicas soldadas.

Para satisfacer esas elevadas exigencias, los soldadores perfeccionan los aparatos y la tecnología, crean dispositivos especiales. Después de la severa comprobación en trabajos responsables, muchos aparatos y dispositivos creados especialmente para la cohetería, encuentran aplicación en muchas otras ramas de la industria.

Condiciones poco comunes. El cohete portador lanza al cosmos la nave o la estación. Las personas tendrán que trabajar y vivir en condiciones poco comunes. Las personas se confían a la defensa de la nave cósmica. Pero los propios metales, plásticos y otros materiales, con los cuales se construye la nave, también tienen que soportar la acción de las sobrecargas, el recalentamiento y todo género de los más diversos tratamientos "cósmicos". Pero incluso los materiales de la más alta calidad pueden sufrir "contrariedades". Por ahora aún no está excluido que pueda dañar la nave cósmica un meteorito u otra nave.

¿Se podrá soldar la grieta o la perforación en condiciones cósmicas? ¿De qué manera soldar de unidades separadas

grandes estructuras cósmicas? ¿No afectarán a los procesos de soldadura las peculiares condiciones del cosmos?

Las peculiaridades fundamentales del cosmos, como medio ambiente donde deberán cumplirse trabajos de soldadura, consisten en lo siguiente:

1) presencia de la ingravidez;

2) existencia del profundo vacío en el espacio circundante, siendo muy grande la velocidad de evacuación (difusión) de los gases y vapores desde la zona de soldadura;

3) intervalo de temperaturas, bastante amplio, bajo las cuales puede encontrarse el metal fundido y en cristalización.

Como ustedes ya saben, también en la Tierra algunos métodos de soldadura se ejecutan en condiciones "semicósmicas", en vacío. Entre estos procedimientos figuran la soldadura por bombardeo electrónico y la soldadura por difusión. Además esta última no está relacionada con la fusión y la cristalización libre del metal, lo que significa que casi no depende de la ingravidez. Es más, el agarrotamiento de piezas comprimidas con fuerza, fenómeno similar a la soldadura por difusión, a veces en condiciones cósmicas puede tener lugar de manera espontánea. Con el fin de prevenir este fenómeno incluso se toman medidas especiales. Sin embargo, la soldadura por difusión requiere un ajuste muy exacto de los bordes y esfuerzos para comprimir las piezas.

Por todo ello, al elegir los métodos de soldadura para investigarlos en condiciones cósmicas, se decidió prestar especial atención a los métodos menos "claros" y al mismo tiempo más difundidos y fiables de la soldadura: al arco, por bombardeo electrónico y por contacto. Era necesario establecer cómo se comportará el metal fundido del baño de soldadura en condiciones de ingravidez, qué peligro presentarán los vapores del metal para los cosmonautas, los equipos y para toda la nave.

Las condiciones cósmicas obligaron a los soldadores a meditar sobre muchas cuestiones científicas y técnicas. Por ejemplo, para que pueda existir el estado plásmico al arco de

la sustancia, deberá ionizarse alguna sustancia. Sin embargo, no se dispone de qué ionizar, pues... en el espacio entre el electrodo y el artículo existe vacío. Incluso aún suponiendo que después de que se excite el arco, éste arderá en los vapores del metal, ¿qué hacer al principio, con qué y cómo excitarlo?

Tomemos, por ejemplo, otro caso, cuando se emplea la soldadura al arco con electrodos fundibles se forman gotas, sobre cuyas dimensiones y dirección del vuelo inciden con vigor las fuerzas de gravedad y de tensión superficial. En las condiciones del cosmos la fuerza de gravedad está ausente, además, la fuerza de tensión superficial varía. Resulta terrible incluso imaginarse qué daño podría causar una gota de metal incandescente volando libremente por la nave cósmica.

¿Cómo controlar la fusión del metal del electrodo? ¿De qué manera desintegrar las gotas? ¿De qué modo orientarlas con exactitud en dirección al baño?

La colectividad del Instituto de soldadura eléctrica E. O. Patón", pudo dar respuesta a estas y muchas otras cuestiones, halló interesantes y originales soluciones.

Laboratorio volante. Para comprobar è investigar los métodos perspectivos de soldadura en èl cosmos fue nesesario ejecutar investigaciones minuciosas de laboratorio. Lo más dificil era simular al mismo tiempo el vacío y la ingravidez. Para ello se creó un complejo de equipos constituido por cámaras de vacío, bombas mecánicas de vacío preliminar, así como bombas de sorción aplicando la técnica de getter, aparatos de soldadura y dispositivos de mando. Los oscilógrafos y las cámaras cinematográficas rápidas estaban destinados a registrar los parámetros fundamentales del régimen, el comportamiento del baño y de las gotas. A fin de obtener la ingravidez, el complejo se ubicó en un avión transformado en laboratorio.

Estos vuelos presentan un aspecto poco común. El avión bien asciende o, por el contrario, desciende, como si estuviera

navegando sobre olas enormes, cuya altitud es de varios kilómetros, y en la cresta de esa empinada ola todo, lo que no está sujetado, planea autónomamente en la cabina del avión. En ese preciso instante, en la ingravidez, surgida durante varios segundos, se apresuran a realizar su experimento en turno los colaboradores del Instituto de soldadura eléctrica. Treinta segundos de ingravidez es un tiempo muy corto para el experimento, para conocer aquello que se oculta tras el brillo del arco y el resplandor del metal fundido. También durante ese medio minuto los experimentadores permanecían en condiciones incómodas para el trabajo. Pero éstas no eran las únicas dificultades que recaían sobre los colaboradores del laboratorio. A medida que se impulsaban los programas de investigaciones cósmicas, ellos tenían que penetrar más y con mayor profundidad en los diversos procedimientos de soldadura, familiarizarse con abundantes y complejos aparatos e instrumentos. Además, ¡investigar y elaborar de manera simultánea unos cuantos métodos de soldadura!

Los experimentos llevados a cabo en el laboratorio volante enriquecieron la ciencia de soldadura con observaciones interesantes. Los experimentos extensos y multifacéticos permitieron establecer las particularidades más características de los diversos métodos de calentamiento y soldadura (por bombardeo electrónico, con soplete de plasma, al arco, heliosoldadura, etc.). Es cierto, que algunos de los experimentos en el laboratorio volante no pudieron culminarse. Sólo los primeros segundos, desde el comienzo de la soldadura, en las cámaras existía un vacío profundo, después en ellas aparecía una cantidad tal de gases y vapores que las bombas no conseguían succionar. Sin embargo, en el avión no se podían instalar cámaras voluminosas y bombas más potentes. También resultó demasiado corto el tiempo de ingravidez artificial, por lo cual el metal cuyo volumen era mayor de 10–15 mm^3 no lograba cristalizarse en ese breve lapso, por lo que no se consiguió estudiar hasta el fin los

procesos de conformación de la costura.

No obstante, los experimentos previos en el laboratorio colante proporcionaron un valioso material científico, sin el cual hubiera sido imposible diseñar la instalación especial para soldadura en condiciones cósmicas circunterrestres. "Volcán" así se bautizó la instalación automática compleja, montada por los colaboradores del Instituto de soldadura eléctrica en la nave cósmica "Soyuz-6".

Soldadura en el cosmos. El 16 de octubre de 1969, los cosmonautas de la nave cósmica "Soyuz-6", G. S. Shonin y V. N. Kubasov, por primera vez en el mundo, ejecutaron la sucesivamente soldadas muestras de diferentes materiales, aplicando los procedimientos de soldadura con soplete de plasma, al arco con electrodos fundibles y por bombardeo electrónico. Asimismo se ensayó el procedimiento de corte separador con haz electrónico.

El proceso que mejor transcurría era el de soldadura con haz electrónico. Para la conformación normal de la unión soldada, las condiciones cósmicas dejaron de ser un obstáculo.

El régimen de soldadura (intensidad de corriente y tensión del arco) con electrodos fundibles siguió siendo el mismo que se utiliza en la Tierra. El metal a unir se fundía bien y la costura que se formaba era densa sin inclusiones gaseosas soldadura en el cosmos. En la instalacion "Volcán" fueron y de escoria. De manera inesperada comenzó a comportarse en forma diversa el arco para dos métodos diferentes de soldadura al arco. Al soldar con electrodo fundible, la descarga del arco estable y prolongada existía en los vapores del material del electrodo. Para crear el arco cuando se empleaban electrodos no fundibles se probó la variante de soldadura con soplete de plasma: a través del estrecho canal de la tobera se suministraba gas en el cual precisamente tenía que arder el arco. Pero ese gas se disipaba al instante mismo en que salía de la tobera, su concentración en el espacio del

arco resultó ser insuficiente para obtener el arco contraído y lograr una fusión estable de los bordes.

En el verano de 1973, los experimentos de soldadura se ejecutaron en la estación "Skylab" por los astronautas americanos.

Los primeros pasos de la soldadura en el cosmos ofrecieron resultados esperanzadores. Se logró aclarar mucho, pero... aún surgieron muchas más incógnitas. Así, por ejemplo, debido a la ingravidez cambiaban las condiciones de separación de las fases líquida, sólida y gaseosa en la zona de soldadura, lo que exigía medidas adicionales para evitar que surgieran poros y aparecieran inclusiones en las costuras. La enorme diferencia de temperaturas en sectores muy cercanos (el frío cósmico y al lado el caldeo hasta la temperatura de fusión), suscitará deformaciones y tensiones excesivas. Asimismo, surgen dificultades enormes al crear el equipo de soldadura del cual se exigen alta fiabilidad y seguridad, masa mínima y potencia máxima y muchas otras cosas.

Claro está que ésos no son todos los problemas y, es posible que incluso no sean los más importantes. Seguirán surgiendo problemas con cada nuevo paso del hombre en el espacio cósmico.

Invitación a trabajos submarinos. Tras el fondo del relevante acontecimiento jalonado por la primera soldadura cósmica, guedó a la sombra otro experimento, menos efectivo, pero de gran perspectiva y muy importante para la humanidad. En el año 1970, en el fondo del río Dniéper en la zona de la ciudad de Dniepropetrovsk, a una profundidad de diez metros, por primera vez en la práctica mundial se ejecutó la soldadura semiautomática, con una costura resistente y compacta de una tubería de acero para alta presión.

En principio, el tratamiento submarino de metales al arco, o sea, el corte y la soldadura, es conocido desde hace ya casi 100 años. En los años 80 del siglo pasado, el físico electricista

ruso D. A. Lachninow, cortó con el arco placas de acero sumergidas en el agua. También N. N. Benardos realizó experimentos exitosos de soldadura bajo el agua. Durante la Gran Guerra Patria, la soldadura al arco bajo el agua, así como el corte, con electrodos unitarios recubiertos con revestimientos impermeables, comenzó a utilizarse mucho para reparar la gran cantidad de daños en las partes submarinas de los buques y de los puentes destruidos, en operaciones de salvamento y de emergencia en la flota. Pero se trataba de un procedimiento rudimentario manual de reparación. Así se conservó, sin grandes cambios, durante casi tres decenios, puesto que no hacían falta grandes trabajos de soldadura bajo el agua.

En el transcurso de varios siglos, el océano mundial sirvió como ruta de comunicación entre países y continentes. En el presente, adquiere gran importancia como fuente potencial alimenticia, energética, de recursos minerales, así como territorio para la ubicación de empresas industriales. Se incrementa la extracción mundial de petróleo y gas en la planicie continental, donde los pozos se disponen a profundidades de hasta 200 m. Cimentaciones de acero sobre pilotes para las plataformas de perforación, tuberías de profundidad de gran diámetro, depósitos submarinos de petróleo, estaciones submarinas, habitadas y deshabitadas, todo ello se ha convertido ya en una realidad. Existen proyectos de centrales eléctricas atómicas flotantes en el mar e incluso de ciudades enteras. Los ricos yacimientos de concreciones de manganeso y ferromagnéticas, que se encuentran en el fondo del mar, pueden convertirse en importantísimas fuentes de metales. Para ello habrá que transformarlas *in situ*, allí donde se extraen, en empresas automatizadas.

Es evidente que todas las estructuras, que se puedan montar fuera del agua, conviene soldarlas antes de sumergirlas. Sin embargo, también sobre la soldadura recaerá un enorme volumen de trabajos submarinos durante el

ensamblaje de las estructuras metálicas, su reparación o reconstrucción.

Los soldadores en los más diversos países del mundo acumulan experiencias de trabajos submarinos, buscan soluciones científicas a la multitud de problemas que surgen. Ya hoy día, la soldadura submarina se aplica con gran difusión en los trabajos de construcción de puentes, instalaciones portuarias, plataformas de perforación, estacadas, tuberías submarinas, etc. Se han elaborado dos métodos de soldadura que, de manera convencional, pueden llamarse seco y húmedo.

Cuanto más profundo, tanto más problemas. Tratándose del método "seco", en el lugar donde se ejecutan los trabajos de soldadura, se instala y fija una cámara habitable, abierta por debajo. Hacia su interior se suministra aire comprimido (o una mezcla de gases), que desaloja el agua y deja el sitio libre para la reparación. El proceso de soldadura, en estas condiciones, casi no difiere de la soldadura común en tierra firme, pero este método es muy caro y son limitadas sus posibilidades: no cualquier instalación submarina es "accesible" para la cámara.

El método húmedo es más económico, sencillo y universal. No obstante, el hecho de que la zona de soldadura esté rodeada de agua, tiene sus incidencias tanto para el proceso de soldadura, como en la calidad de la costura.

¿Qué ocurre durante la soldadura bajo el agua? ¿Qué problemas surgen?

Si se observan todas las condiciones preparatorias y de soldadura (que en principio no difieren mucho de las comunes), el arco, bajo el agua, arde con estabilidad y posee todas sus propiedades normales. Aunque el arco esté rodeado de agua, arde allí dentro de la ampolla de gas que se forma como resultado de la evaporación y descomposición del agua. La ignición estable del arco se explica en razón del principio de la energía mínima, que se manifiesta de la misma manera

que tiene lugar cuando se forma el arco contraído de plasma. El enfriamiento intensivo de la columna del arco conduce a un desprendimiento más profuso de energía, lo que compensa el incremento de su pérdida. Esto de expresa en una elevación de la tensión.

Al incrementar la profundidad de inmersión, crecerá también la presión en la zona de soldadura. Debido a esto, tanto en caso de soldadura "húmeda", como "seca", se modifican la cinética y el equilibrio de las reacciones químicas en el baño de soldadura. Pero las composiciones de los fundentes, revestimientos, alambres, están calculados para "el trabajo" a presión normal. Es decir, surge el riesgo de empobrecer el baño de alguna sustancia o, viceversa, introducir en él sustancias sobrantes. Es natural que cuanto mayor sea la presión, tanta mayor cantidad de oxígeno y nitrógeno se disuelve en el metal. Con el aumento de la presión, también en la zona de soldadura crece la profundidad de fusión.

No vamos a detenernos en otros problemas científicos, tecnológicos y constructivos, así como en otras peculiaridades de la soldadura bajo el agua. Se presta gran atención a la soldadura submarina en la URSS, EE. UU., Japón, Inglaterra, Francia y en toda una serie de otros países. Ya se han realizado multitud de investigaciones, elaborándose procesos tecnológicos de soldadura al arco (en dióxido de carbono, en argón, en una mezcla de gases, recurriendo a electrodos unitarios en posición horizontal), por explosión y con haz electrónico. Se han creado sopletes con pantalla de agua que conserva la ampolla de gas en la zona de soldadura.

En el Instituto de soldadura eléctrica "E. O. Patón", se ha creado un equipo especial semiautomático para soldar con alambre de electrodo, con lo que el buzo-coldador obtuvo la posibilidad de trabajar sin perder tiempo en fijar el electrodo nuevo. Simultáneamente, se elaboró un alambre especial para electrodos que asegura la composición y propiedades requeridas del metal de la costura.

Resulta difícil sobrevalorar la importancia de este logro de los soldadores soviéticos para realizar los grandiosos planes orientados a conquistar los mares y océanos. En sustitución de los soldadores a mano, llegó el operador pertrechado de cómodos aparatos portátiles que aseguran obtener a gran profundidad uniones, que respondan por entero, incluso, a las más elevadas exigencias de las normas técnicas terrestres.

Empero éstos son sólo los primeros, aunque importantes, éxitos. Aún no ha llegado el período de los problemas fundamentales de la soldadura submarina y de su solución.

El robot-soldador en el cosmos y bajo el agua

Se concede un gran papel en el dominio del cosmos y de las profundidades del océano a los dispositivos semiautomáticos manipulados por el hombre, así como a dispositivos automáticos de acción autónoma.

¿Qué pasará con la soldadura? ¿Quién o qué la ejecutará?

Por ahora aún no se puede responder por entero y definitivamente a esos interrogantes, son precisas investigaciones serias de estas cuestiones. Pero lo más posible es que los soldadores tengan que crear robots especiales.

¿Cómo serán éstos?

De momento, nos los podemos imaginar en sus rasgos más generales.

Con el fin de liquidar los daños causados por meteoritos hacen falta trabajos especiales de reparación. Los robots deberán tener acceso hacia cualquier punto en la superficie de la estación cósmica. Los detectores-buscafugas descubrirán la brecha, la examinarán, transmitiendo los correspondientes datos hacia el ordenador de a bordo, el cual calculara y preparará el programa de trabajo. El robot, después de recibir la orden, se dirigirá hacia el lugar dañado

y comenzará a trabajar. En caso de necesidad, el hombre podrá seguir la marcha de la soldadura con ayuda de un sistema de televisión.

Los robots deberán tener posibilidad de desplazarse a lo largo de toda la superficie, por las correspondientes guías, saliendo hacia ellas desde sus hangares.

Sin embargo, en el cosmos, en condiciones de ingravidez, el robot no puede moverse tan fácilmente. Se separará de la superficie de la estación, excepto en aquellos raros casos en que en ella se cree gravitación artificial. Tiene poca perspectiva el empleo de apoyos magnéticos, pues las aleaciones "cósmicas" en lo fundamental son antimagnéticas. También está excluida la utilización de ventosas al vacío.

Es posible que en la superficie de los artículos cósmicos a soldar sea necesario prever salientes tecnológicos especiales, que podrán utilizarse para retener y mover el robot. También son posibles otras variantes aún no imaginadas.

Para fabricar o reconstruir las estaciones o naves cósmicas, seguramente harán falta otras clases de robots. Puesto que el orden de operaciones se elabora de antemano, la sucesión del montaje en el cosmos también se podrá asignar y programar con premeditación en la Tierra. El ordenador de a bordo se necesitará tan sólo para introducir en el trabajo del robot las correcciones imprescindibles. Pero después de culminar el montaje de la estación, el robot-constructor retornará a la base.

Antes de crear el robot-soldador cósmico, será preciso superar muchos problemas técnico-científicos. Semejante robot deberá tener una fuente de alimentación lo bastante potente, poseer un sistema desarrollado para recibir la información externa que permita detectar el lugar de soldadura, orientar correctamente el órgano de trabajo (electrodo o la instalación de haz electrónico) respecto al artículo y controlar la marcha del proceso de soldadura. El sistema de mando del robot en cuestión deberá asegurar no sólo el desplazamiento del órgano de trabajo en el espacio, según

una trayectoria asignada y deseada, sino que también el control de todo el ciclo y los parámetros del régimen de soldadura.

Los soldadores tendrán que crear también el robot-soldador "submarino". En este caso aparecerán, asimismo, nuevos problemas, tanto similares a los cósmicos, como los suyos propios suscitados por las particularidades del medio ambiente. Dificultades en cuanto al desplazamiento, al parecer, no se prevén. Se puede crear con facilidad una flotabilidad nula y navegar, sin dificultad, junto al artículo. Para su deslizamiento vertical, son suficientes medios relativamente sencillos que gobiernen la magnitud de la fuerza de Arquímedes. No será difícil sujetarlo, para ello bastará con dispositivos que empleen la fuerza de gravedad, o ventosas al vacío.

No obstante, bajo el agua, sobre todo a grandes profundidades, la persona tiene que encontrarse en una cámara gruesa, que la proteja contra la presión hidrostática del agua. El soldador-buzo no puede entrar en contacto directo con el medio circundante, sus movimientos están obstaculizados por el equipo de buzo. La posición inestable y la mala visibilidad dificultan el trabajo, además, en la profundidad la persona pierde por entero la operabilidad. Incluso una operación tan sencilla como es la soldadura de horquillas, para fijar los cordones, hacia los barcos hundidos, siendo la profundidad poco más de 100 m, resulta insoluble. Aquí es imprescindible un soldador-autómata. Este último tendrá que localizar el lugar correspondiente en el barco, limpiarlo de pintura y herrumbre, orientar y oprimir la horquilla y, por último, soldarla al barco con una costura sólida. Semejante labor, así como la soldadura de cañerías empalmadas de antemano, estructuras metálicas de piezas estandarizadas, podrán cumplirlas los robots de la primera generación con programa rígido, si éstos se modernizan un tanto.

Más del 95% del océano tiene profundidades inaccesibles para los buzos. Por eso en el futuro los trabajos de montaje

y soldadura tendrán que ejecutarlos robots autónomos submarinos, que reciban instrucciones desde una base de mando. Aquí a los soldadores les toca en suerte realizar una gran labor investigativa para crear los métodos y medios de soldadura a grandes profundidades marítimas.

A manera de resumen

Nuestra tarea consistía en relatar la esencia de la ciencia de la soldadura y sobre los éxitos alcanzados por la técnica de soldadura. No tuvimos posibilidad de hablar detalladamente sobre las personas, gracias a las cuales se consiguieron dichos éxitos en el terreno de la soldadura – sobre los científicos y obreros, ingenieros, técnicos, colaboradores de laboratorio, etc. Son muchos y todos diferentes, pero a todos ellos les une rasgos comunes de su carácter que les permitieron convertirse en verdaderos creadores de lo nuevo en la técnica, en exploradores del futuro en esta rama del conocimiento humano.

¿Qué cualidades deberá poseer el innovador? Tesón en el trabajo, conocimientos profundos, amplio horizonte intelectual, habilidad práctica, audacia y osadía, sin todo esto hoy día es imposible aportar algo esencial a la ciencia aplicada en el moderno nivel de su desarrollo.

Pero lo principal reside en que deberá apasionarse con ardor por su labor. Sobre esta cualidad del innovador, Alexei Alexándrovich Ulésov, dos veces Héroe del Trabajo Socialista, soldador eléctrico que elaboró e implantó el método de soldadura al arco en baño, dijo lo siguiente:

"Apreciar su profesión significa: tener una actitud creadora frente al trabajo, ser ardiente defensor de todo aquello que eleve la productividad del trabajo, abarate la producción y facilite el trabajo". Prepararse para realizar un trabajo creador e innovador, adquirir conocimientos, forjar en sí las correspondientes cualidades, deberá emprenderse en los años escolares.

